



**Universidad
Carlos III de Madrid**

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Dpto. Tecnología Electrónica

**“ACTUALIZACION DEL SOFTWARE DE CONTROL DE UN
MONOCROMADOR”**

TRABAJO FIN DE GRADO

INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

AUTOR:

JAVIER SÁNCHEZ SANTERO

TUTOR DE PROYECTO:

BRAULIO GARCÍA CÁMARA

JUNIO 2017



Agradecimientos:

Quisiera dar las gracias a todas las personas que me han ayudado en la realización del presente proyecto fin de grado. En particular agradecer a familiares y amigos por su constante apoyo y por supuesto a mi tutor, por su paciencia y dedicación.



Resumen

En el presente trabajo se muestra cómo se va a actualizar el sistema de control de un monocromador y un fotomultiplicador para la medida espectral de diversas muestras. Hoy en día, la aplicación con la que se manejan los instrumentos indicados es muy antigua e impide el desarrollo de determinados trabajos al utilizar medios no estandarizados e incluso obsoletos, es por ello, por lo que se ha planteado la necesidad de generar una nueva aplicación para conseguir mejores rendimientos incorporando a los instrumentos, medios técnicos más avanzados y/o estandarizados, manteniendo las especificaciones del entorno prácticamente iguales.

Con esto, se pretende que la actualización sea más manejable y más cómoda facilitando el trabajo de las pruebas y las investigaciones que se realizarán con los instrumentos.

Se buscará que sea lo más económica posible para evitar así el costo elevado que supondría la compra de un software nuevo de control, también se pretende que el software y las herramientas que se utilicen sean actuales y fácilmente accesibles para cualquier trabajador o usuario y compatibles con cualquier ordenador y con sistemas operativos actuales.

Abstract

In the present work the control system of a monochromator and photomultiplier will be updated in order to make spectral measurements of various samples. Currently exists an application that handle the instruments, this application is too old, what limits its daily use. For this reason, it has been proposed to generate a new application with similar environment specifications than the current old one.

This new update is intended for a more manageable and comfortable use, and it would therefore facilitate the work and research carried out with those instruments.

It will be sought to be as economical as possible to avoid a large expense that would lead to the purchase of new control software. It is also intended that all software and tools used are current and easily accessible to any employee or user, on most of the computers and operating systems.



ÍNDICE GENERAL

1. Introducción y objetivos	7
1.1. Introducción.....	7
1.2. Objetivos.....	12
1.3. Especificaciones del Sistemas	13
1.3.1. Parámetros a controlar	13
1.3.2. Comunicaciones	16
1.3.3. Interface de LabVIEW	17
1.3.4. Almacenamiento de datos	17
1.4. Fases del Proyecto	18
1.5. Medios utilizados	19
2. Comunicación y control del monocromador	25
2.1. Introducción a la operación y características del monocromador	25
2.2. Control del monocromador	27
2.3. Sistema de comunicación.....	29
2.3.1. Controlador GPIB-USB de alta velocidad	31
2.3.2. Controlador monocromador.....	32
2.4. Sistema de control	36
3. Comunicación y control del fotomultiplicador	38
3.1. Introducción a la operación y características del fotomultiplicador	38
3.2. Sistema de comunicación.....	41
3.2.1. Controlador NI USB-6009	41
3.3. Sistema de control	44
4. Sistema de almacenamiento y representación	46
5. Implementación y pruebas.	49
6. Presupuesto	55
7. Conclusiones y posibles líneas futuras	56
7.1. Conclusiones.....	56
7.2. Líneas futuras	56
Bibliografía.....	57
Acrónimos.....	58
Anexos	59
A.1 Manual de usuario.....	59



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Microscopio óptico	9
Figura 2 Entorno de control	14
Figura 3 Aplicación anterior	15
Figura 4 Monocromador	19
Figura 5 Fotomultiplicador	19
Figura 6 Conjunto dock.....	20
Figura 7 GPIB-USB-HS	21
Figura 8 NI USB-6009	22
Figura 9 LabVIEW 2016.....	23
Figura 10 Ordenador portátil.....	23
Figura 11 Cable BNC	24
Figura 12 Fuente alimentación	24
Figura 13 Disposición Czerny-Turner de un monocromador.....	25
Figura 14 Conector Bus GPIB	29
Figura 15 Protocolo IEEE-488	29
Figura 16 Comunicación Monocromador	32
Figura 17 Front Panel del Controlador	33
Figura 18 Block Diagram Cambiar Parámetros	34
Figura 19 Block Diagram Preguntar.....	35
Figura 20 Dirección GPIB	36
Figura 21 Block Diagram Longitudes de onda	36
Figura 22 Block Diagram enviar y recibir	37
Figura 23 Partes de un fotomultiplicador.....	38
Figura 24 Conexión tarjeta de adquisición	41
Figura 25 Test comunicación NI USB-6009	42
Figura 26 Configuración DAQ Assistant	43
Figura 27 Block Diagram DAQ Assistant.....	44
Figura 28 Block Diagram convertidor dinámico.....	45
Figura 29 Block Diagram calibrado de intensidad	45
Figura 30 Block Diagram Guardar	46
Figura 31 Front Panel Guardar	47
Figura 32 Reporte	47
Figura 33 Block Diagram Grafica y tabla	48
Figura 34 Block Diagram Grafica y tabla	49
Figura 35 Nanocilindros de Aluminio campo claro.....	50
Figura 36 Prueba 1 Aplicación antigua	50
Figura 37 Prueba 1 Aplicación nueva.....	51
Figura 38 Nanocilindros de Aluminio campo oscuro.....	51
Figura 39 Prueba 2 Aplicación antigua	52
Figura 40 Prueba 2 Aplicación nueva.....	52
Figura 41 Blanco en campo oscuro	53
Figura 42 Prueba 3 Aplicación antigua	53



Figura 43 Prueba 3 Aplicación nueva.....	54
Figura 44 Entorno de prueba.....	59

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Especificaciones GPIB-USB-HS	16
Tabla 2 Especificaciones generales NI-6009	17
Tabla 3 Características Hamamatsu E8515-01	20
Tabla 4 Características GPIB-USB-HS	21
Tabla 5 Características generales NI USB-6009	22
Tabla 6 Características entrada analógica NI USB-6009	22
Tabla 7 Características fotomultiplicador R5984.....	40
Tabla 8 Presupuesto	55

1. Introducción y objetivos

1.1. Introducción

Ya en 1704, en sus primeros experimentos con un prisma, Isaac Newton acuñó la palabra espectro al describir la luz del Sol, mientras esta era dispersada en sus diferentes colores al atravesar un prisma. [1]

A lo largo del tiempo, y no de forma continua, se han ido sucediendo avances, así a comienzos del siglo XIX, Fraunhofer descubrió la existencia de líneas espectrales "líneas de Fraunhofer" y con las investigaciones de Kirchhoff y Bunsen, se comenzó con la atribución sistemática de espectros a los elementos químicos. [2] La espectroscopia, permite realizar análisis cualitativos y cuantitativos de la composición de los materiales mediante su respuesta óptica. Esto se puede hacer tanto de objetos tan lejanos como las estrellas, como descifrar la composición de muestras orgánicas, inorgánicas o de análisis elemental.

La espectroscopia es una técnica analítica experimental ampliamente utilizada por los físicos y los químicos que se basa en el estudio de la interacción entre la radiación electromagnética y la materia, principalmente, mediante absorción o emisión de energía radiante. [3] Desde un punto de vista básico, esta interacción está directamente relacionada con las diferencias de energía que hay entre las posibles transiciones electrónicas entre niveles atómicos y/o moleculares, a los efectos resonantes que puedan excitarse en las muestras. Todo esto permite obtener una "huella" espectroscópica de las mismas.

Se pueden hacer una amplia clasificación de los tipos de espectroscopia, en función del método espectroscópico (todos ellos basados en la medida de la intensidad y longitud de onda de la energía radiante).

También podemos decir que hay tantos tipos de espectroscopia como fuentes de energía. Aquí unos ejemplos:

Espectroscopia Astronómica

La energía de objetos celestes se utiliza para analizar su composición química, densidad, presión, temperatura, campos magnéticos, velocidad, y otras características. Hay muchos tipos de energía (espectroscopías) que pueden ser utilizados en la espectroscopia astronómica.

Espectroscopia de Absorción Atómica

La energía absorbida por la muestra se utiliza para evaluar sus características. A veces, la energía absorbida hace que la luz se libere de la muestra, que puede medirse mediante una técnica como la espectroscopia de fluorescencia.

Espectroscopia de Rayos X

Esta técnica implica la excitación de electrones internos de los átomos, que pueden ser vistos como absorción de rayos X. Se puede producir un espectro de emisión de fluorescencia de rayos X cuando un electrón cae de un estado de energía superior a la vacante creada por la energía absorbida.



Espectroscopia de Llama.

Las muestras de solución líquidas son aspiradas en un quemador o una combinación de nebulizador/quemador, desolvatadas, atomizadas, y a veces excitadas a un estado electrónico de energía más alta. El uso de una llama durante el análisis requiere combustible y oxidante, típicamente en forma de gases.

Espectroscopia visible

Muchos átomos emiten o absorben la luz visible. A fin de obtener un espectro lineal fino. El espectro se estudia en absorción o emisión. La espectroscopia de absorción visible a menudo se combina con la de absorción ultravioleta (espectroscopia UV/Vis).

Espectroscopia Raman

Se basa en la dispersión inelástica o dispersión Raman de la luz monocromática. Es usada en física y química de la materia condensada para estudiar modos de baja frecuencia. Generalmente utiliza un láser en el rango de luz visible, la luz del láser interactúa con los fotones, el desplazamiento en energía de los fotones da información sobre los modos vibracionales del sistema.

Espectroscopia de Infrarrojo (IR)/ Infrarrojo y Cercano (NIR)

La espectroscopia IR junto a la espectrometría de masas y la resonancia magnética nuclear, forman la base del análisis orgánico cualitativo contemporáneo centrado en la identificación de la estructura molecular de compuestos y mezclas desconocidas.

Espectroscopia de Chispa o del arco

Se utiliza para analizar los elementos metálicos sólidos o las muestras metálicas hechas conductores por ser esmeriladas con el polvo de grafito. El análisis requiere el paso de una chispa eléctrica con él para producir un calor que excite los átomos. Los átomos emocionados emiten luz de longitud de onda características que se pueden detectar usando un monocromador.

La espectroscopia Ultravioleta se puede utilizar para cuantificar la concentración de proteína y de ADN en una solución y para analizar fluorescencia de una muestra. [4]

En todos estos casos, es necesario conseguir una descomposición espectral, radiaciones monocromáticas, bien de la luz incidente o de la luz reemitida por las muestras. Esto permitirá distinguir entre los distintos componentes o fenómenos que estén ocurriendo en las muestras.

En el caso específico de este trabajo, la aplicación es la espectroscopia de campo oscuro. Este tipo de espectroscopia utiliza radiación visible que se enfoca en la muestra bajo un ángulo de incidencia muy grande.

La microscopia de campo oscuro es una técnica de iluminación especializada, muy utilizada en laboratorios debido a que muchas muestras en condiciones normales de iluminación en campo claro son muy difíciles de observar de forma nítida, y la microscopia de campo oscuro se aprovecha de la iluminación oblicua para mejorar el contraste. [5] Para ello se utiliza un montaje experimental basado en un microscopio óptico convencional y un condensador de campo oscuro (Figura 1).



Figura 1 Microscopio óptico

Para ver un resultado más preciso y obtener un fondo más oscuro, es necesario trabajar con un condensador diseñado especialmente para campo oscuro, que consiste en bloquear los rayos centrales que alcanzan al condensador, por medio de un disco o algún otro tipo de dispositivo, de manera tal que el cono iluminador es un cono hueco de luz, con mayor apertura numérica que la del objetivo (Figura 1). Esta forma de iluminación permite que sólo aquellos rayos que han sido desviados por la muestra observada, sean captados por el objetivo, eliminando los rayos directos de la fuente de luz.

Hay diferentes modelos, condensadores de campo oscuro en "seco" con aire entre la lente superior del condensador y la parte inferior del portaobjetos. O bien condensadores de "inmersión" que requieren una gota de aceite de inmersión sobre la parte superior del condensador y la parte inferior del portaobjetos. [5] El condensador de campo oscuro de inmersión posee lentes con espejos internos para dejar pasar los rayos de gran oblicuidad y libres de aberración cromática, los cuales producen mejores resultados en conseguir un fondo más negro. Tal vez el condensador de campo oscuro más ampliamente utilizado es el paraboloide, que consiste en una pieza sólida de vidrio con mucha precisión en la forma de un paraboloide.

Este tipo de microscopía es muy adecuada para muestras muy pequeñas, y en particular muestras micro- y nanométricas, ya que la cantidad de luz proveniente de ellas es muy pequeña en comparación con el campo incidente. Eliminado dicho campo incidente, se puede observar la muestra requerida con suficiente contraste. [7]



Tal y como se ha comentado anteriormente, la espectroscopía requiere la descomposición espectral bien de la luz incidente sobre la muestra, bien de la luz reemitida por la misma. En todo caso se hace necesario el uso de un monocromador para separar las diferentes longitudes de onda de una luz policromática.

Un monocromador es, como tal, el dispositivo óptico que permite aislar las radiaciones de longitud de onda deseada que inciden o se reflejan desde el conjunto, obteniendo rayos de luz monocromática. Está constituido por las rendijas de entrada y salida, colimadores y una red o prisma para dispersar la radiación incidente.

Una lente que lleva el haz de luz que entra con una determinada longitud de onda hacia un prisma el cual separa todas las longitudes de onda de ese haz y la longitud deseada se dirige hacia otra lente que direcciona ese haz hacia la rendija de salida.

Una vez descompuesta la luz, el siguiente paso es detectar la misma, transformándola en un parámetro fácilmente manipulable, como tensión o corriente. Esta es la función del fotodetector, en este caso un fotomultiplicador.

El fotomultiplicador es un dispositivo que permite detectar luz con alta sensibilidad. Consta básicamente de un elemento (fotocátodo) en donde, por efecto fotoeléctrico, se produce un electrón (fotoelectrón) que es acelerado hacia una serie de electrodos (dinodos) debido al campo eléctrico creado por una tensión suministrada externamente. Este fotoelectrón inicial va siendo multiplicado en las distintas etapas a su paso por los dinodos obteniéndose en el último de ellos (ánodo) una corriente apreciable que sobre una resistencia de carga adecuada puede formar un impulso de tensión detectable. Los fotones producidos por el centellador tras la detección de los rayos de luz, son emitidos en unos pocos microsegundos y la respuesta total del fotomultiplicador consiste en un único impulso de amplitud proporcional a este número de fotones y por tanto proporcional también a la energía depositada.

El uso de los fotomultiplicadores ha experimentado un gran auge en los últimos años debido a los progresos conseguidos en el desarrollo de los fotocátodos y en las etapas de amplificación. Son aparatos muy versátiles que permiten ser usados en un gran número de aplicaciones. La gran ventaja del fotomultiplicador sobre otros detectores luminosos es la amplificación por emisión secundaria. Se pueden conseguir factores de multiplicación desde 10^3 hasta 10^9 . [8]

Tipos de fotomultiplicadores:

Tipo frontal. Tiene un fotocátodo semitransparente el cual es un fotocátodo del tipo transmisor, que permite tener mejor uniformidad que el tipo lateral. La disposición frontal permite barrer áreas en un rango definido por el tamaño del tubo fotomultiplicador.



Tipo lateral. Los fotomultiplicadores laterales emplean un fotocátodo opaco o sea un fotocátodo del tipo reflector y una estructura de jaula circular para los dinodos, lo que ofrece buena sensibilidad y amplificación con un voltaje de alimentación relativamente bajo. Usados generalmente en espectrofotometría y sistemas fotométricos en general, reciben la luz incidente por un lado del tubo de vidrio. Las ventajas son su relativo bajo costo.

En el laboratorio se va a trabajar con un monocromador que sigue la disposición de Czerny-Turner el cual utiliza espejos en vez de lentes. En concreto el modelo es el Acton SpectraPro-300i. Además está montado en el monocromador un conjunto de encaje en el que opera y va instalado el fotomultiplicador lateral que se encarga de amplificar la señal. Dicho fotomultiplicador es en concreto el modelo Hamamatsu E5815-01. Ambos elementos son los principales del sistema que se va a desarrollar en este trabajo.



1.2. Objetivos

Este trabajo se centra en actualizar el software de control de un monocromador, actualizando el comercial del que se dispone ahora. Anteriormente se estaba trabajando con una aplicación, la cual controlaba el monocromador y servía como entorno de prueba, pero solo se podía ejecutar en un ordenador que tuviera el sistema operativo Windows 98. Esto implica que el ordenador que se tenía que utilizar era muy antiguo y en cualquier momento por sus características intrínsecas, podía dejar de funcionar. Al ser el ordenador tan antiguo en el único formato que se podía grabar las pruebas que se realizaban con el monocromador era el formato de disco 3/4 que prácticamente se está quedando obsoleto y para un uso frecuente de los datos de pruebas en ordenadores actuales supone un gran problema.

La comunicación que utiliza el monocromador al ser también un instrumento muy antiguo es GPIB (General Purpose Interface Bus). Esto inhabilita el uso de ordenadores portátiles para manejar el instrumento debido a que en la actualidad los ordenadores no llevan incorporado puerto GPIB. Además otro problema es que la actualización de la aplicación para nuevos sistemas operativos es de alto coste económico.

Existía otro problema debido a que el ordenador también tiene que recibir información del fotomultiplicador, que conectado con la aplicación de control actual, permite medir la salida óptica del mismo. En el ordenador antiguo lo hacía a través de una tarjeta de adquisición de datos que estaba insertada en la torre del PC y que era muy poco accesible.

Para estos problemas se ha diseñado y construido un sistema en el que el entorno de prueba es muy común y fácilmente actualizable y utiliza el software *LabVIEW*, el cual es comúnmente usado muchos centros de pruebas. Con esto se mejora la actualización y la compatibilidad con diferentes sistemas operativo.

El problema de la comunicación con el monocromador se solventará con un controlador GPIB de alto rendimiento que tiene salida a USB y así poder conectar el instrumento a cualquier ordenador actual.

Para recibir la información del fotomultiplicador vamos a utilizar una tarjeta de adquisición de datos portátil, fácilmente manejable y que además está compuesta por más entradas y salidas que se pueden utilizar en un futuro para realizar diferentes pruebas.

Una vez que se pueda controlar el instrumento desde cualquier ordenador y recibir correctamente las señales del fotomultiplicador, el formato en el que se quieran guardar las pruebas es más variado y manejable para cualquier trabajador.

1.3. Especificaciones del Sistemas

Para desarrollar el sistema que se va a implementar se han propuesto una serie de requisitos, que se van a especificar en los siguientes apartados.

1.3.1. Parámetros a controlar

El entorno de prueba debe ser parecido a lo que existía en la aplicación antigua, es decir, recibir datos del monocromador y del fotomultiplicador y representarlos en una tabla de datos y en una gráfica. Esta estará compuesta en el eje x por las longitudes de onda y en el eje y por la intensidad relativa en función de cada longitud de onda.

Para ello el usuario tiene que establecer los siguientes parámetros:

- **Longitud de onda inicial:** debe introducir el valor, con precisión como máximo de tres decimales, de la longitud de onda con la que quiera que empiece el estudio de la intensidad de luz.
- **Longitud de onda final:** debe introducir el valor, con precisión como máximo de tres decimales, de la longitud de onda con la que quiera que termine el estudio de la intensidad de luz.
- **Número de puntos:** debe introducir el valor, en forma de número entero, del número de longitudes de onda intermedias entre los dos valores indicados anteriormente que desea estudiar.
- **Tiempo de integración:** debe introducir el valor, en milisegundos, del tiempo que quiera que el fotomultiplicador este capturando la intensidad de la luz en cada longitud de onda.

También se debe de realizar un entorno más simple y más intuitivo para facilitar el uso de la aplicación a los diferentes usuarios e investigadores. Para conseguir este propósito se ha decidido utilizar dos paneles indicadores de errores, que nos indican si hay algún error en la comunicación con el monocromador y el tipo de dicho error, para concretar más se ha diferenciado en errores de entrada y de salida.

En la Figura 2 se puede ver la apariencia final de la aplicación que controla el monocromador con las especificaciones indicadas en este capítulo.

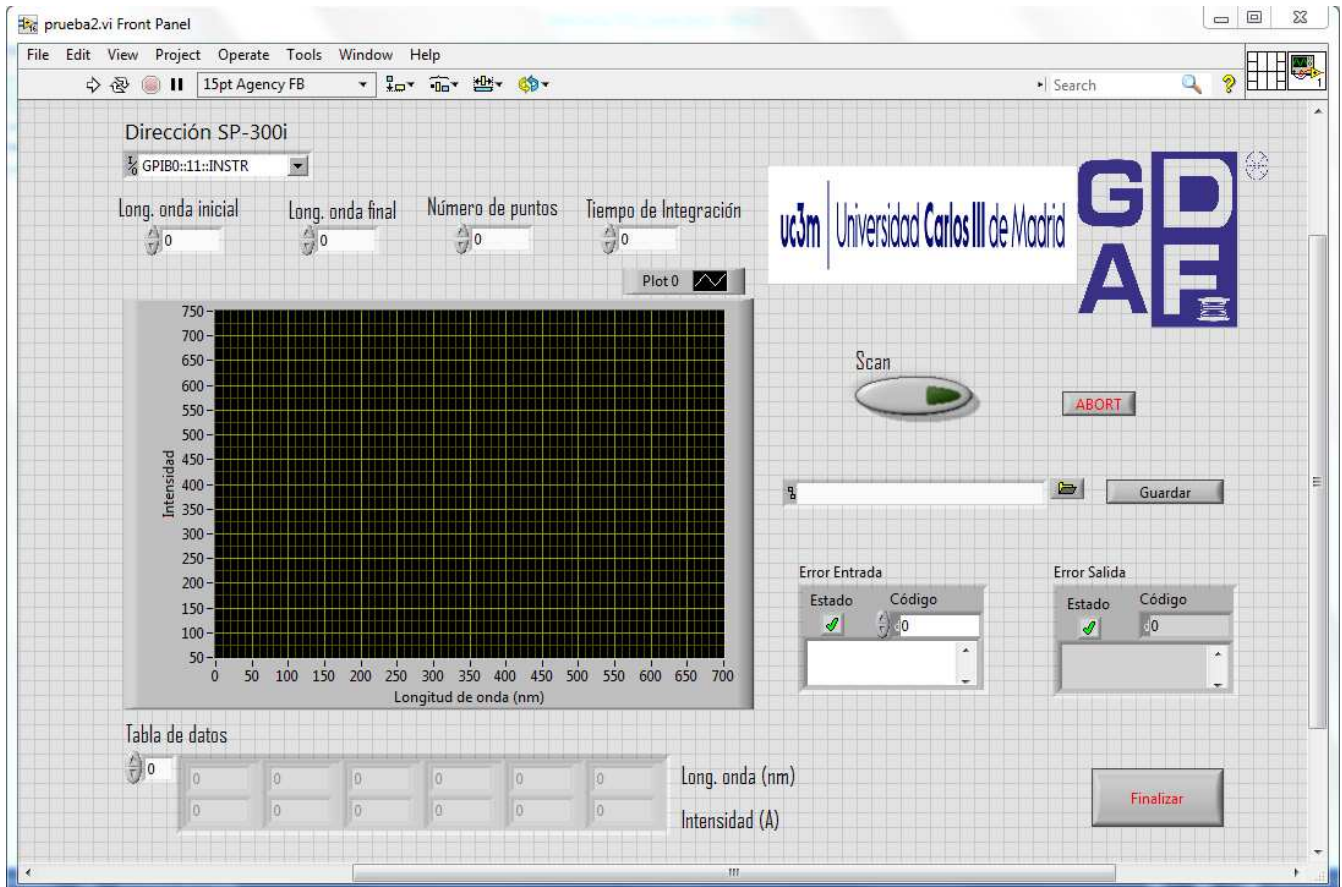


Figura 2 Entorno de control

Como se puede observar los parámetros que tenemos que modificar se encuentran en la parte superior de la gráfica, también se puede ver los indicadores de errores, tanto de entrada como de salida y la dirección para guardar los datos en formato Excel según se muestran en la tabla que está debajo de la gráfica. Esta tabla mostrara todos los valores que se muestran en la gráfica. Más adelante se explicará el porqué de esta configuración y la implementación de la aplicación.

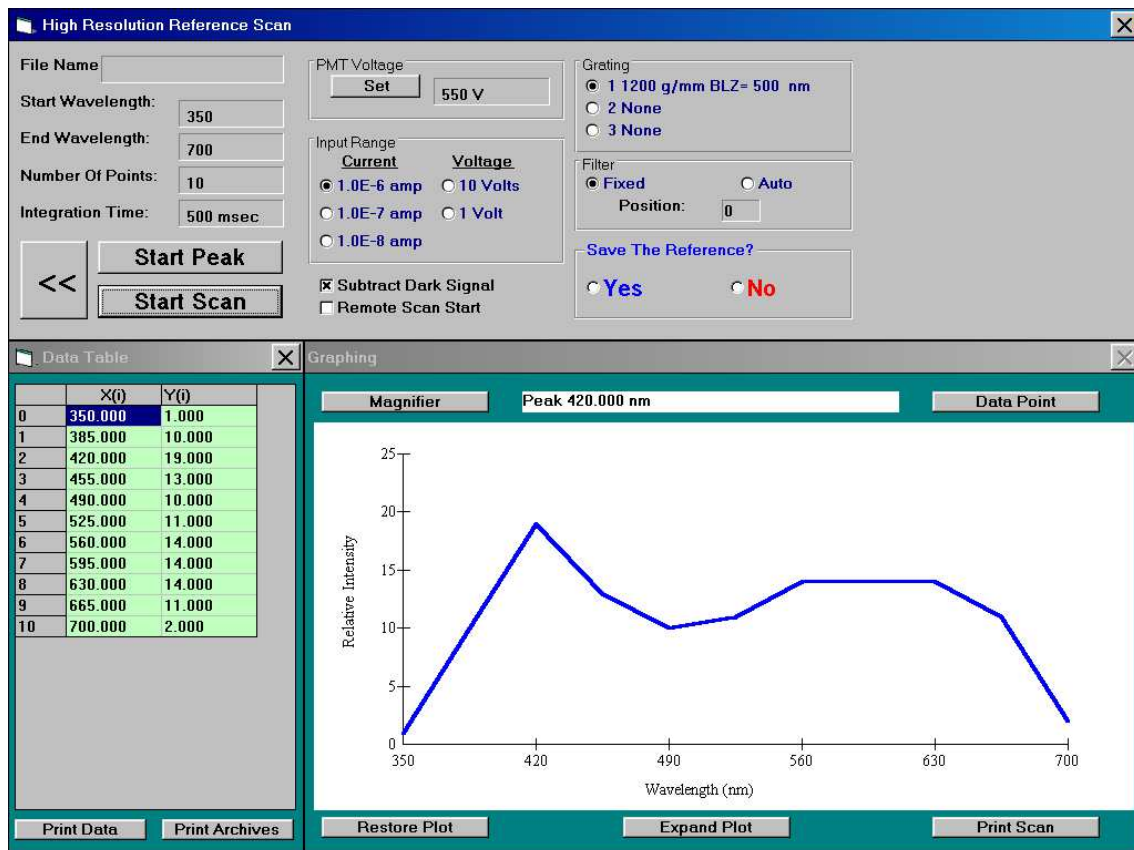


Figura 3 Aplicación anterior

En la aplicación final se han simplificado algunas cosas con respecto a la antigua como la selección de la rejilla, el rango de intensidad y el modo del filtro que siempre es fijo.

La selección de la rejilla se ha eliminado porque el monocromador solo dispone de una rejilla en estos momentos y el rango de intensidad se ha decidido que siempre sea el mismo.

1.3.2. Comunicaciones

- **Monocromador:**

La comunicación con el monocromador se realiza a través de GPIB que es un estándar bus de datos digitales. El bus fue estandarizado por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Este permite que hasta 15 dispositivos se conecten a través de un bus paralelo simple de 8 bits.

La opción que permite la comunicación con el ordenador portátil es utilizar el controlador de *National Instruments* GPIB-USB-HS. Este es un controlador de alto rendimiento que transforma cualquier PC con un puerto USB en un controlador IEEE488.2 completamente funcional para hasta 14 dispositivos GPIB programables. Este controlador aprovecha Hi-Speed USB para brindar un rendimiento superior de hasta 1.8 MB/s con el protocolo IEEE 488 estándar y hasta 7.7 MB/s con el protocolo IEEE 488 de alta velocidad. Las principales especificaciones que tiene que cumplir este controlador se detallan en la Tabla 1.

ESPECIFICACIONES	
Factor de forma	USB
Familia de productos	GPIB
Sistema operativo/Objetivo	Windows
Compatibilidad con estándar GPIB	IEEE 488

Tabla 1 Especificaciones GPIB-USB-HS

- **Fotomultiplicador:**

La comunicación con el fotomultiplicador debe realizarse a través de una tarjeta de adquisición de datos en concreto el USB-6009. El cual brinda funcionalidad DAQ (Data AcQuisition) básica para aplicaciones como registro de datos simple, medidas portátiles y experimentos académicos de laboratorio.

Como se verá más adelante, en este proyecto solo vamos a utilizar una entrada analógica de este DAQ. Esta tarjeta se puede programar con *LabVIEW*. Las principales especificaciones que tiene que cumplir se detallan a continuación (Tabla 2).



ESPECIFICACIONES GENERAL	
Familia de productos	DAQ Multifunción
Tipo de medida	Voltaje
Factor de forma	USB
Resolución de entrada analógica	14 bits
Rango de voltaje máximo	-10V a 10V
Sistema operativo	Windows

Tabla 2 Especificaciones generales NI-6009

1.3.3. Interface de LabVIEW

LabVIEW es un entorno para el control de instrumentos que está bastante extendido y que actualmente se utiliza en diversos montajes experimentales del Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas (GDAF-UC3M) cuyos miembros serán los usuarios de esta aplicación. Por esta razón y con el fin de poder extender dicha aplicación en un futuro a otros dispositivos, se especifica que el control se haga a través de *LabVIEW*.

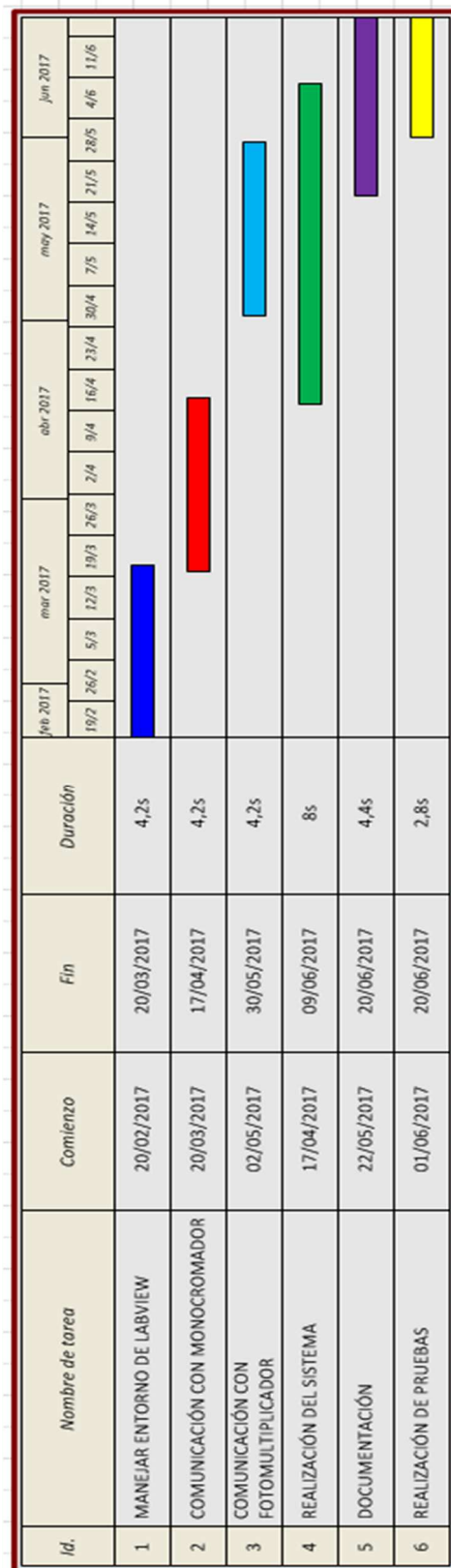
1.3.4. Almacenamiento de datos

Para guardar los datos se ha decidido, que la aplicación una vez generada la gráfica pueda exportar los datos en formato tabla a Microsoft Excel.

Se ha considerado el software de Microsoft debido a que es un programa muy extendido en todo el mundo y permite el manejo de cálculos con datos, que puede ser muy útil para estudiar la información recibida por el monocromador.

1.4. Fases del Proyecto

Las fases que se han seguido para realizar el presente trabajo se pueden ver especificadas en el siguiente diagrama de Gantt.



1.5. Medios utilizados

- **Monocromador:**

Modelo Acton SpectraPro-300i.

Dispositivo que permite seleccionar y transmitir una estrecha banda de longitudes de onda, provenientes de la luz policromática (Figura 4).

Más adelante se explicara el funcionamiento y las características de dicho monocromador.



Figura 4 Monocromador

- **Fotomultiplicador:**



Modelo Hamamatsu R5984

Dispositivo que permite detectar luz con una alta sensibilidad. Se produce un fotoelectrón que va siendo acelerado hasta que se produce una corriente apreciable (Figura 5).

Más adelante se explicara el funcionamiento y las características de dicho monocromador.

Figura 5 Fotomultiplicador

- **Conjunto de encaje para fotomultiplicador (dock):**



Modelo Hamamatsu E5815-01.

El E5815-01 consta de un encaje y un circuito divisor de tensión para operar un fotomultiplicador.

En la tabla 3 se pueden observar las principales características.

Figura 6 Conjunto dock

Parámetros	Valor
Tensión de alimentación entre la caja y los terminales	1500 V
Tensión de alimentación entre GND y cable HV	-1500 V
Corriente del divisor de tensión (a tensión de alimentación máxima)	0.46 mA
Consumo de energía (a tensión de alimentación máxima)	682 mW
Resistencia de aislamiento entre caja y terminales (Min.)	$1 \times 10^{11} \Omega$
Señal de falta de corriente (Max.)	$1 \times 10^{-10} A$
Resistencia total al divisor de tensión	3,3 M Ω
Señal de salida	DC/pulso
Salida lineal en modo DC (a tensión de alimentación máxima)	100 μA
Temperatura de funcionamiento	0° a 50°C
Temperatura de almacenamiento	-15° a 60°C
Peso	44 g

Tabla 3 Características Hamamatsu E5815-01

- **Tarjeta controladora:**

Modelo NI GPIB-USB-HS

Transforma cualquier PC con un puerto USB en un controlador IEEE488.2 completamente funcional para hasta 14 instrumentos GPIB programables (Figura 7).



Figura 7 GPIB-USB-HS

Este controlador es fácil de instalar y usar porque no hay interruptores DIP externos y no necesita reiniciar su computadora para que el sistema reconozca su interfaz IEEE 488.2. Se trata de una interfaz plug-and-play que el sistema operativo reconoce y configura automáticamente tan pronto como lo conecte físicamente al puerto USB de su computadora. Con el GPIB-USB-HS, puede ponerse en marcha rápidamente, por lo que puede centrarse en el desarrollo de sus aplicaciones de control de instrumentos. [9]

En la tabla 4 vienen especificadas sus características principales.

CARACTERÍSTICAS	
Factor de forma	USB
Familia de productos	GPIB
Sistema operativo/Objetivo	Windows
Compatibilidad con estandar GPIB	IEEE 488
Máy. Razón de transferencia (IEEE 488.1)	1830 kB/s
Máy. Razón de transferencia (HS488)	7920 kB/s
Analizador GPIB interno	Sí
Número de puertos	1
Máy. Conexiones dispositivos/puerto	14

Tabla 4 Características GPIB-USB-HS

- **Tarjeta de adquisición de datos (DAQ):**

Modelo NI USB-6009

El USB-6009 brinda funcionalidad DAQ básica para aplicaciones como registro de datos simple, medidas portátiles y experimentos académicos de laboratorio.



Figura 8 NI USB-6009

La tarjeta de adquisición se compone de 8 entradas analógicas (14 bits, 48 kS/s), 2 salidas analógicas estáticas (12 bits), 12 E/S digitales, contador de 32 bits y además dos salidas de tensión de +5v y +2,5v. [10] Todo esto está energizado por bus para una mayor movilidad y conectividad de la señal integrada.

En la tabla 5 se pueden ver algunas características principales y en la tabla 6 se puede observar las características de las entradas analógicas que son las que se van a utilizar para la realización del presente trabajo.

CARACTERÍSTICAS GENERAL	
Familia de productos	DAQ Multifunción
Tipo de medida	Voltaje
Factor de forma	USB
Sistema Operativo / Objetivo	Linux
	Mac OS
	Pocket PC
	Windows
Compatible con RoHS	Sí
Tipo de aislamiento	Ninguno

Tabla 5 Características generales NI USB-6009

CARACTERÍSTICAS ENTRADA ANALÓGICA	
Canales de una sola terminal	8
Canales diferenciales	4
Resolución de entrada analógica	14 bits
Rango de voltaje máximo	-10V a 10V
Precisión	7.73 mV
Rango de voltaje mínimo	-1 V a 1 V
Precisión	1.53 mV
Número de Rangos	8
Muestreo Simultáneo	No
Memoria interna	512 B

Tabla 6 Características entrada analógica NI USB-6009

- **Interface**

Modelo LabVIEW 2016

El software *LabVIEW* es ideal para cualquier sistema de medición o control, es un entorno de desarrollo para la resolución de problemas, la productividad acelerada y la innovación continua.

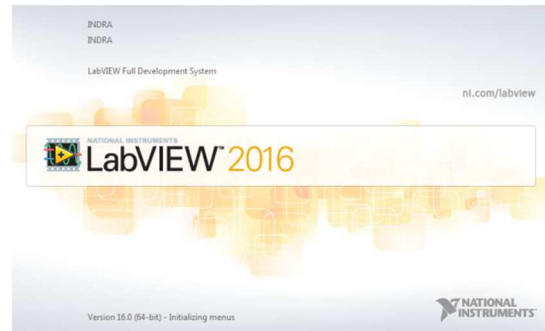


Figura 9 LabVIEW 2016

LabVIEW hace sencilla la creación de aplicaciones de interface. El interface gráfico requiere de un monitor en el que se representa un entorno que permite comunicar dos sistemas que no hablan el mismo lenguaje.

Suele estar constituida por una serie de menús e iconos diseñados para las necesidades de los ingenieros o científicos que quieren estudiar o probar el sistema. *LabVIEW* proporciona una gran cantidad de objetos como gráficas, tablas, termómetros, todo tipo de indicadores y muchos otros más que conectándolos entre sí con diagramas de bloques te permiten configurar el comportamiento y el control de un sistema.

Estos programas desarrollados con *LabVIEW* se llaman Instrumentos Virtuales, o VIs. Los cuales se dividen en dos:

- *Front Panel*: donde se observa cómo va a ser la aplicación que se va a manejar, se puede modificar el diseño y la apariencia como el usuario lo desee.
- *Block Diagram*: donde se realiza la implementación de la aplicación, por así decirlo es el lugar donde va el software, que como ya hemos dicho antes se implementa a través de bloques.

- **Ordenador portátil:**



Modelo HP Elitebook

Se puede utilizar cualquier ordenador portátil el cual tenga instalado el software de *LabVIEW*. Si no lo tiene se puede descargar e instalar con licencias. No hace falta indicar que debe tener como mínimo dos puertos USB ya que en la actualidad cualquier ordenador los lleva.

Figura 10 Ordenador portátil

- **Cable BNC:**

Se ha considerado para conectar el fotomultiplicador y el dock que tienen salida BNC con la tarjeta de adquisición de datos que tiene conexión por cables.



Figura 11 Cable BNC

- **Fuente de alimentación**



Figura 12 Fuente alimentación

Modelo Lendhermack HY30003D-3

Se puede utilizar cualquier modelo de fuente de alimentación que alimente a 12V, que son los necesarios para alimentar el monocromador. En el laboratorio se ha utilizado este modelo porque nos permite alimentar también otros dispositivos a la vez.

2. Comunicación y control del monocromador

2.1. Introducción a la operación y características del monocromador

El funcionamiento de un monocromador se basa en la dispersión de la radiación separando espacialmente en longitudes de onda un haz de luz.

En este trabajo como ya se ha mencionado, se va a trabajar con el Acton SpectraPro-300i que es un monocromador que sigue la disposición de Czerny-Turner. Esta disposición se parece mucho a la de un diseño de espectrógrafo clásico con la salvedad que en este diseño se utilizan espejos en vez de lentes, la disposición más común es aquella en la que los dos espejos son iguales, así como los ángulos formados por estos y la red, ya que de esta forma se consigue eliminar la coma que aparecería en cualquier otro caso. [11] Podemos observar un esquema del mismo en la siguiente figura (Figura 13).

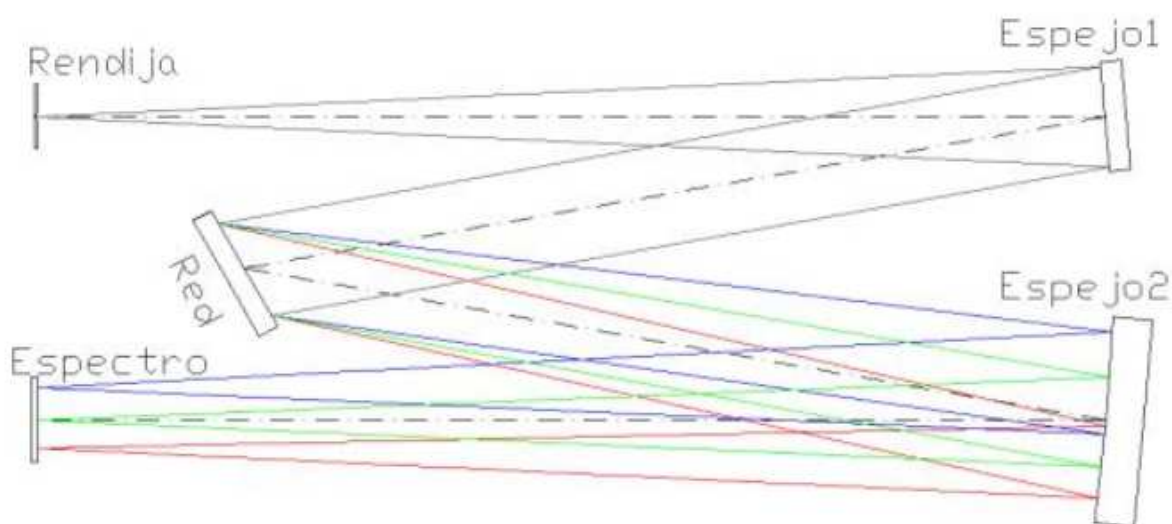


Figura 13 Disposición Czerny-Turner de un monocromador

A continuación se describen algunas de las características principales del monocromador SpectraPro-300i:

- Motor paso a paso integrado con controlador, controlado por un potente microprocesador de 32 bits.
- Interfaces de computadora incorporadas RS232 e IEEE488 para el control del SpectraPro-300i
- Una torreta de rejilla triple que acepta 1, 2 o 3 rejillas, seleccionable mediante control por computadora.



- Sistema de accionamiento directo de exploración digital, que consiste en un engranaje de tornillo sin fin que hace girar la torreta de rejilla.
- Ranuras ajustables bilateralmente, con ajustes micrométricos de ancho de corte de 10 μ m a 3mm.
- Plano focal de 14mm de alto por 27mm de ancho para CCDs (Charge Coupled Device) y otros detectores de array.
- Un plano focal que se extiende 1,0 "(25 mm) fuera de la carcasa del instrumento.
- Parada de enfoque única de 3 puntos y ajuste de enfoque fino para los CCD.
- Resolución de 0.1nm con una rejilla de 1200g / mm.
- Opción de puerto de salida dual, incluyendo ranuras de salida duales, o la combinación de una ranura de salida por un puerto CCD.

2.2. Control del monocromador

El control del monocromador puede ser desde un terminal RS232 o computadora utilizando RS232 o IEEE488. El mismo conjunto de comandos se utiliza tanto para RS232 como para IEEE488. Este último es el que se va a utilizar para la comunicación en este trabajo.

Los comandos se pueden enviar como comandos individuales o agrupados en cadenas de comandos. Todos los comandos son palabras simples (no contienen espacios) y todos los comandos de una cadena están separados por al menos un espacio. Los parámetros, si es necesario, preceden al comando y se separan del comando por al menos un espacio

Cuando se utiliza la interfaz IEEE488 (o GPIB), la dirección predeterminada del dispositivo es 11. La dirección del dispositivo se puede ajustar a cualquier valor de 1 a 30 utilizando el comando SET-ID. El comando ?ID se utiliza para leer de nuevo la dirección IEEE. Cada comando o cadena de comandos debe terminar con un retorno de carro (hexadecimal 0D). Al enviar un comando o una cadena de comandos, es importante esperar a que el SpectraPro complete el procesamiento de esa cadena de comandos antes de enviar otro comando. Esto se logra comprobando el byte de estado. El SpectraPro controla bits en el byte de estado IEEE488 que puede leerse desde el controlador IEEE488. El comando para leer este byte de estado será exclusivo de su controlador IEEE.

Bits de bytes de estado IEEE488:

- Bit 0 0 = el comando está siendo procesado
 1 = SP-300i listo para otro comando
- Bit 1 0 = sin errores
 1 = SP-300i detectó un error en el comando
- Bit 7 0 = no se ha leído ninguna respuesta o respuesta
 1 = SP-300i generó una respuesta que ahora está lista para ser enviada

Los siguientes comandos son los que más hemos utilizado en este trabajo y se han agrupado en 3 grupos:

- **Comandos de Movimiento de Longitud de Onda de Monocromador:**

- I. GOTO Va a una longitud de onda de destino a la velocidad máxima del motor. Acepta la longitud de onda de destino en nm como un número de punto flotante con hasta 3 dígitos después del punto decimal o longitud de onda de número entero sin punto decimal.



- II. *NM* Va a una longitud de onda de destino a una velocidad *NM/MIN* constante especificada por el último comando *NM/MIN*. Acepta la longitud de onda de destino en nm como un número de punto flotante con hasta 3 dígitos después del punto decimal o longitud de onda de número entero sin punto decimal.
- III. *?NM* Devuelve la longitud de onda presente en nm a 0,01 nm de resolución con unidades (nm) anexadas.
- IV. *NM/MIN* Devuelve la velocidad de barrido actual en *NM/MIN* a una resolución de 0,01 nm / min con unidades *NM/MIN* añadidas.

- **Comandos de Control de rejilla:**

- I. *GRATING* Coloca la rejilla especificada en posición a la longitud de onda de la longitud de onda en la rejilla actual. Se permiten hasta nueve (9) rejillas en tres (3) torrecillas. Este comando toma un número de rejilla de 1 a 9.
- II. *? GRATING* Devuelve el número de rejillas actualmente en uso numeradas del 1 al 9.
- III. *TURRET* Especifica la torreta instalada actualmente o la torreta que se va a instalar.
- IV. *? TURRET* Devuelve la torreta correctamente instalada numerada 1 - 3.

- **Comandos de control de desvío:**

- I. *FRONT* Desplaza el espejo desviador designado para colocar el haz en la posición del puerto frontal.
- II. *SIDE* Mueve el espejo desviador designado para colocar el haz en la posición del puerto lateral.
- III. *?MIRROR* Devuelve la posición del espejo desviador designado con las respuestas "front" y "side".
- IV. *?MIR* Devuelve la posición del espejo desviador designado con las respuestas 0 para el frente y 1 para el lado.

2.3. Sistema de comunicación

Para el sistema de comunicación del monocromador hay que formar una interconexión entre el instrumento y los controladores. Estos deben cumplir con alguna norma para que puedan ser usados independientemente de que provengan de distintos fabricantes.

Al ser el monocromador un instrumento antiguo, la conexión se realiza por medio del bus GPIB (General-Purpose Instrumentation Bus) que fue estandarizado por el IEEE como IEEE-488 (Figura 14).



Figura 14 Conector Bus GPIB

El bus GPIB IEEE-488 es un bus asíncrono, permite que haya varios destinos o receptores, por esto hace necesario líneas independientes para indicar que los datos han llegado correctamente y para indicar que el ciclo ha terminado. En la siguiente figura (Figura 15) podemos observar el protocolo de forma esquematizada.

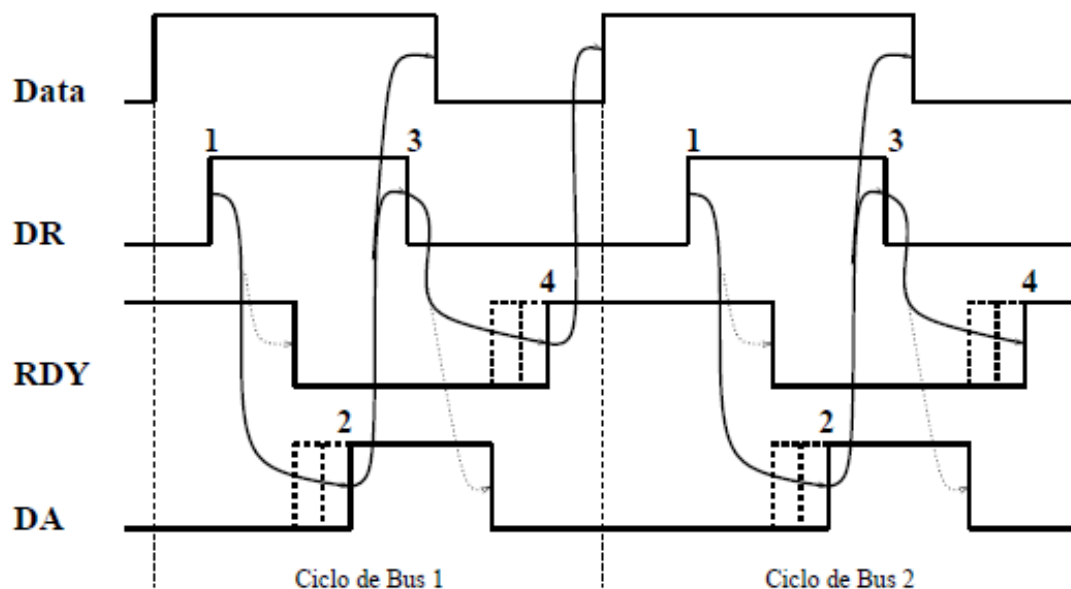


Figura 15 Protocolo IEEE-488



- El maestro comprueba si todos los esclavos están listos (RDY=alto) y, si es así, coloca los datos y activa DR (flanco 1).
- Los esclavos responden colocando a nivel bajo sus señales RDY y, conforme cogen los datos, ponen sus señales DA a nivel alto. La línea RDY señala un nivel bajo en el momento que un esclavo baje su señal RDY, ya que es un AND—cableado. Como DA es también un AND— cableado, la línea DA solo alcanza el nivel alto cuando el más lento de todos haya cogido los datos (flanco 2).
- Como respuesta al flanco de subida de DA, el maestro indica que ha recibido que todos han cogido los datos bajando DR (flanco 3) y retira los datos.
- Los esclavos observan que los datos han sido retirados e indican que están listos para una nueva transferencia poniendo sus señales DA a nivel bajo y sus señales RDY a nivel alto. Como RDY es un AND—cableado la línea alcanza el nivel alto cuando el más lento de todos los esclavos indique que está listo para una nueva transferencia (flanco 4). [12]

Algunas de las características físicas son las siguientes:

- El bus transfiere datos y órdenes a partir de un sistema de 16 líneas que se dividen en 3 grupos:
 - 8 líneas para el bus de datos, por las cuales se transmiten mensajes en forma de Bytes.
 - 3 líneas para el control de transferencia de los bytes, las cuales manejan el protocolo de comunicación.
 - 5 líneas para la administración general del interface.
- La separación promedio entre los dispositivos de todo el sistema debe ser menor de 2m.

Para poder comunicar el monocromador al ordenador portátil, para manejarlo, hemos tenido que instalar en el PC controladores o drivers.



2.3.1. Controlador GPIB-USB de alta velocidad

Para controlar el monocromador primero hemos tenido que instalar un driver en el PC que controla la conexión GPIB-USB. Dicho driver es el NI4882_1600f0 que se ha podido descargar de *National Instruments* y es compatible con *LabVIEW*.

Un controlador de instrumento *LabVIEW* Plug and Play es un conjunto de VIs (Virtual Instruments) que controlan un instrumento programable. Cada VI corresponde a una operación de instrumento, como configurar, disparar y leer mediciones desde el instrumento. Los controladores ayudan a empezar a usar el instrumento desde un ordenador y ahorra tiempo y costo de desarrollo porque los usuarios no necesitan aprender el protocolo de programación para cada instrumento. Con los controladores de código abierto y bien documentados, se pueden personalizar las operaciones para obtener un mejor rendimiento.

En general, el controlador de instrumento *LabVIEW* Plug and Play consistirá en uno o dos archivos de biblioteca VI y uno o más archivos de menú (*.mnu). Todos estos deben guardarse en un directorio único dentro de su directorio <instr.lib> de *LabVIEW*.

Así con este controlador se puede reconocer perfectamente la tarjeta que convierte el bus GPIB a USB y gracias a ello identifica el monocromador.

2.3.2. Controlador monocromador

Para poder comunicarnos con el monocromador una vez que es identificado, *National Instruments* proporciona un programa en el que puedes ver el instrumento que tienes conectado al ordenador, sus características y también puedes enviarle comandos para ver que la comunicación está siendo correcta, como se puede observar en la siguiente imagen (Figura 16) le enviamos a través del programa de NI el comando que viene en el manual MODEL SERIAL seguido del retorno de carro '\r' y el monocromador nos responde con el modelo y el número de serie.

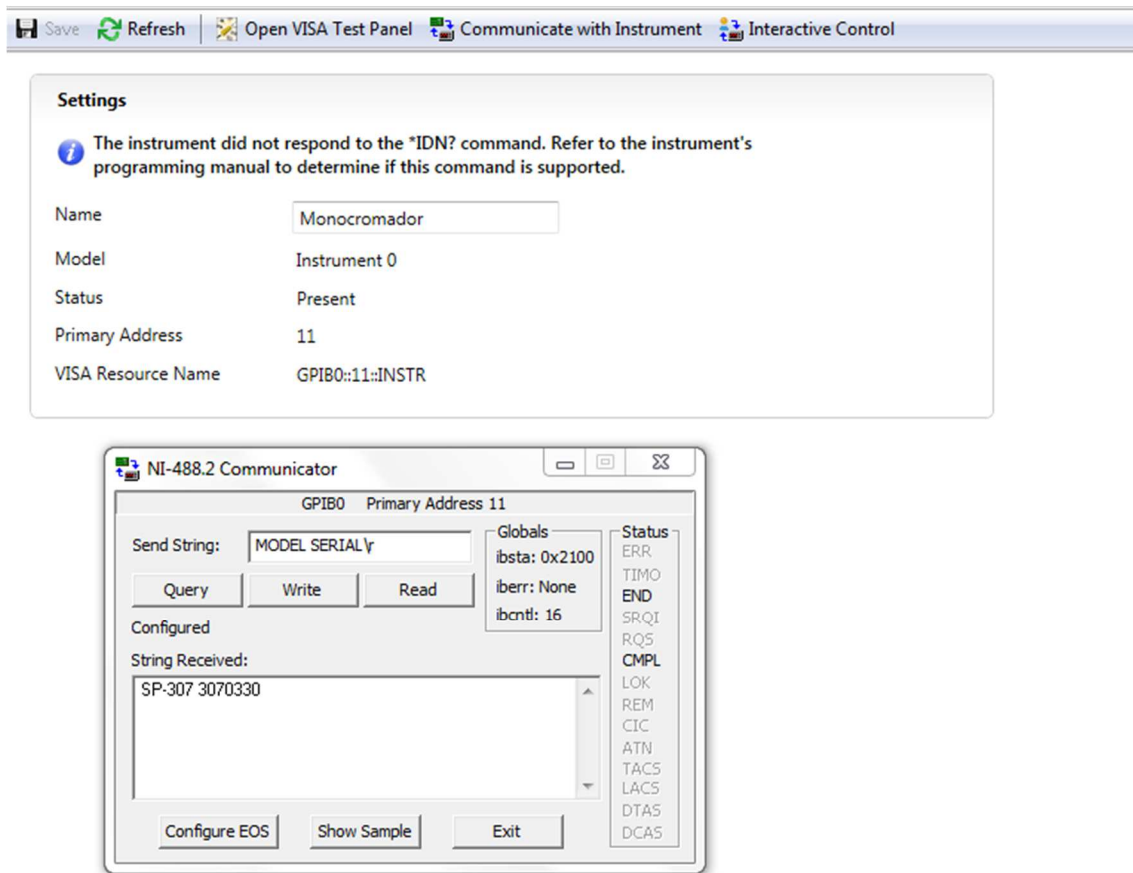


Figura 16 Comunicación Monocromador

Pero para manejar el monocromador desde *LabVIEW*, hay que instalar otro driver.

En este caso *National Instruments* no tiene controlador *LabVIEW* para el modelo del monocromador SP-300i. Lo que se ha tenido que hacer es coger el controlador de un modelo anterior que es el SP-150 y modificar algunos VIs que controlan el instrumento.

En las siguientes figuras se puede observar como esta implementado el diagrama de bloques y el panel frontal, el cual nos permite una comunicación simple con el monocromador.

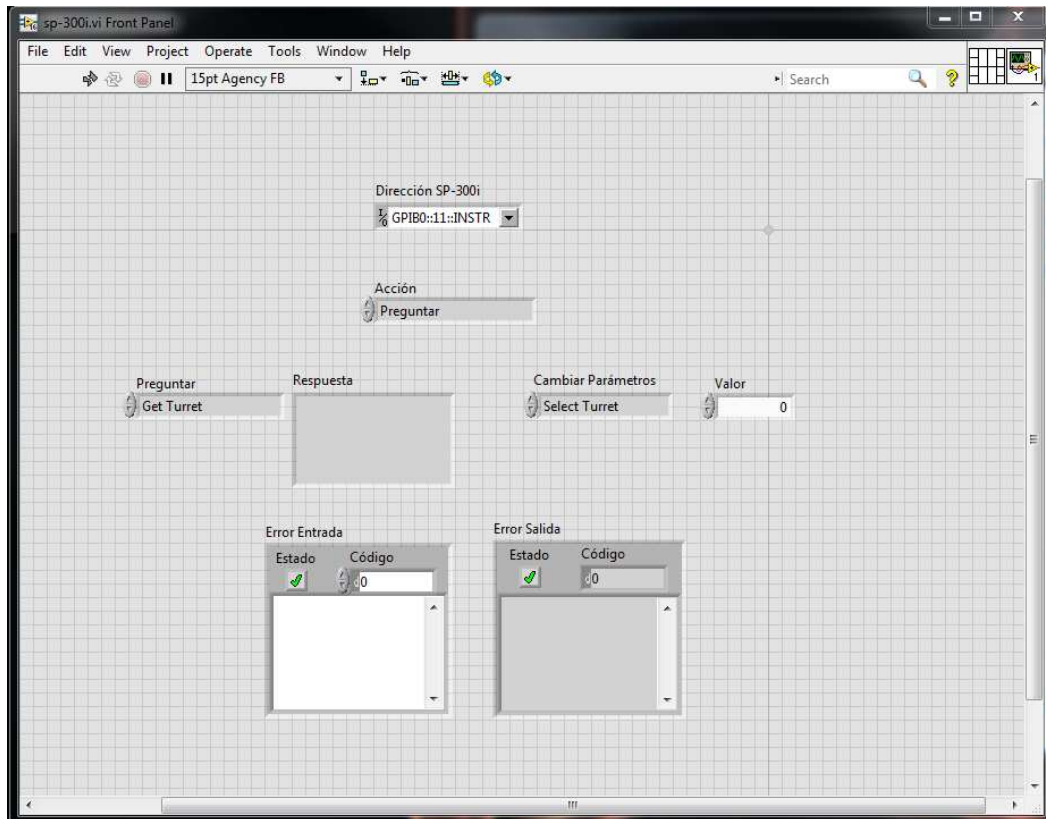


Figura 17 Front Panel del Controlador

Este VI permite realizar dos operaciones:

- 1) Cambiar los parámetros que hemos considerado más importantes del monocromador (es fácilmente actualizable para poder cambiar todos los parámetros que uno quiera). Se puede modificar cada parámetro seleccionándolo a través del control "Cambiar Parámetros" y se le puede asignar el valor deseado en el control numérico "Valor" que está justo al lado, como se puede observar en la imagen anterior (Figura 17). En cualquier momento si los valores introducidos son incorrectos o se produce algún error en la comunicación con el monocromador, aparecerá en los paneles de error, indicándonos el tipo de error y diferenciando si el error es de entrada al monocromador o de salida. Para implementar los cambios de parámetros se ha utilizado una estructura case en la que dependiendo el parámetro que se elija se le envía al monocromador un comando u otro, siempre seguido de un retorno de carro como manda el protocolo.

Los parámetros seleccionados pueden ser los siguientes, entre paréntesis los comandos vistos anteriormente:

- SET SCAN SPEED (NM/MIN)
- SCAN TO (NM)
- GO TO (GOTO)
- SELECT GRATING (GRATING)
- SELECT TURRET (TURRET)

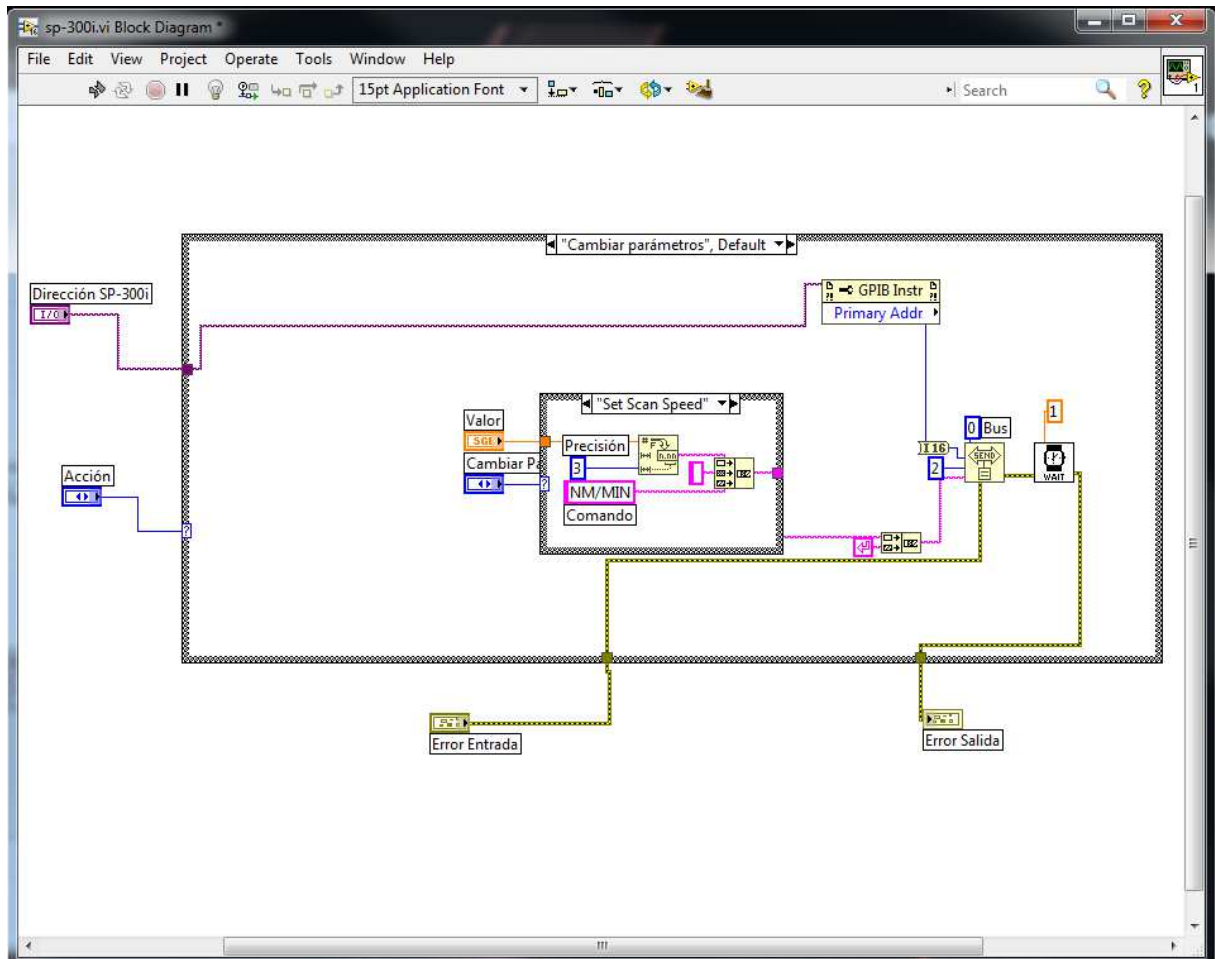


Figura 18 Block Diagram Cambiar Parámetros

- 2) Preguntar al monocromador para que devuelva la información que se le pregunta. Al igual que en la operación anterior "Cambiar Parámetros" se han seleccionado los comandos que proporcionan la información que se ha creído más importante, pero es fácilmente actualizable y ampliable a mas parámetros. También se hace a través de una estructura case, que al igual que en la acción anterior se selecciona lo que se le quiere pedir al monocromador a través del control "Preguntar" y en este caso se envía el comando seleccionado y tras una espera de 1 segundo recibe la respuesta del monocromador. Como en la acción anterior, los errores de entrada y salida aparecerán y si existe algún fallo.

Los parámetros seleccionados pueden ser los siguientes, entre paréntesis los comandos vistos anteriormente:

- GET WAVELENGTH (?NM)
- GET SCAN SPEED (?NM/MIN)
- GET GRATING (?GRATING)
- GET TURRET (?TURRET)

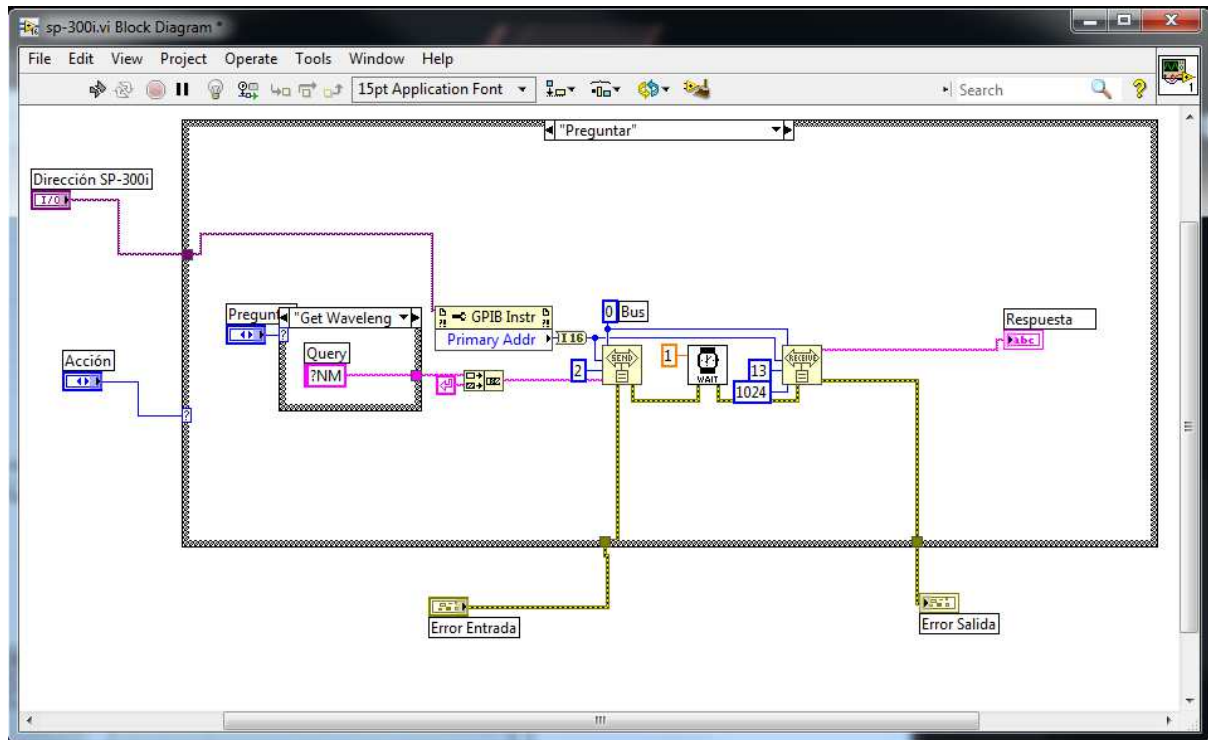


Figura 19 Block Diagram Preguntar

Una vez que ya se ha podido comunicar con el monocromador, se tiene que implementar el sistema con el que se va a controlar el instrumento para que realice las especificaciones indicadas.

2.4. Sistema de control

El monocromador, para cumplir con las especificaciones del sistema, tiene que ir midiendo en las diferentes longitudes de onda que el usuario especifica. El usuario tiene que seleccionar una longitud de onda inicial y una final y decidir cuantas longitudes de onda intermedias quiere.

En primer lugar para saber que se está comunicando con el instrumento que se quiere, el monocromador en este caso, se tiene que seleccionar la dirección GPIB en la que está el instrumento.

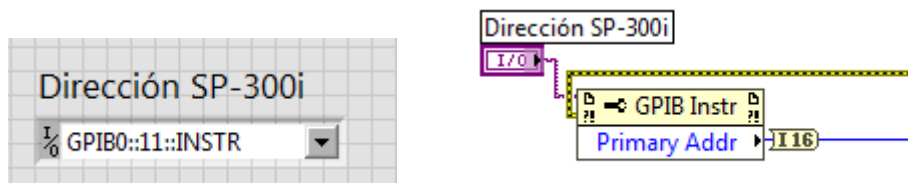


Figura 20 Dirección GPIB

En este el caso la dirección del monocromador, por defecto es la 11, aunque se podría cambiar mediante comandos de direcciones.

En el diagrama de bloques de la Figura 20 (parte derecha de la imagen) el bloque 'GPIB Instr' recibe la dirección por parte del instrumento y esta dirección tiene que estar conectada a los bloques de enviar y recibir que se utilizan con el monocromador y que se verán más adelante.

Para implementar esto, en *LabVIEW* se ha decidido hacer mediante un bucle *for* que se ejecuta el número de veces que el usuario elige como número de puntos más una. Esto se hace para que el instrumento empiece a medir en la longitud de onda que se establece como inicial y también mida en la última longitud de onda que se ha establecido. Y con una serie de operaciones se saca el incremento de longitudes de onda para cumplir con los parámetros que ha introducido el usuario.

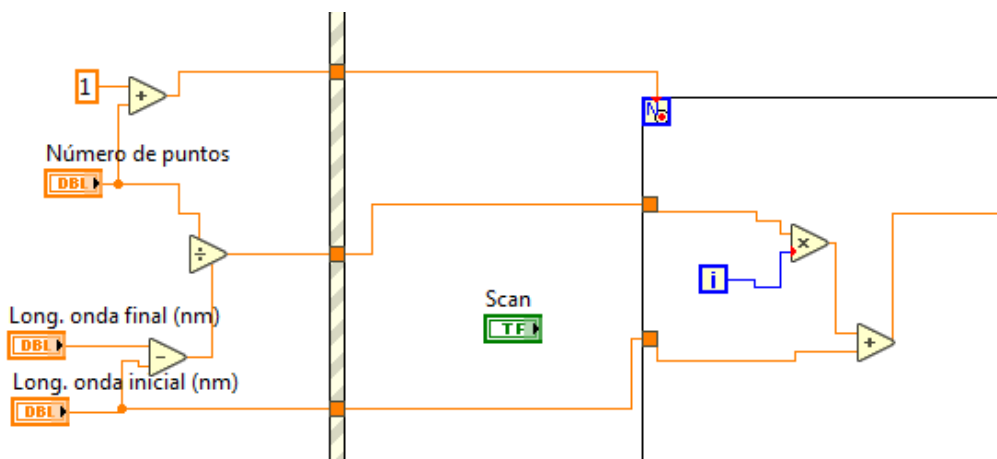


Figura 21 Block Diagram Longitudes de onda

Como se puede observar en la Figura 21 anterior el número de puntos que se introduce más uno va conectado a 'N' que es el número de veces que se va a ejecutar el bucle *for*. Y para sacar el incremento de longitudes de ondas utilizamos la siguiente formula, como podemos observar en el diagrama de bloques. Siendo 'i' el número de iteraciones que lleva el bucle *for*.

$$\frac{\lambda_{final} - \lambda_{inicial}}{n^{\circ} \text{ de puntos}} \times i + \lambda_{final}$$

Una vez que están seleccionados los parámetros la acción que se realiza en el bucle *for* es la de enviarle la longitud de onda en la que tiene que situarse el monocromador y después de enviarle la acción hay que preguntarle al instrumento en qué longitud de onda está, de esta forma se asegura que no le hemos enviado un valor incorrecto.

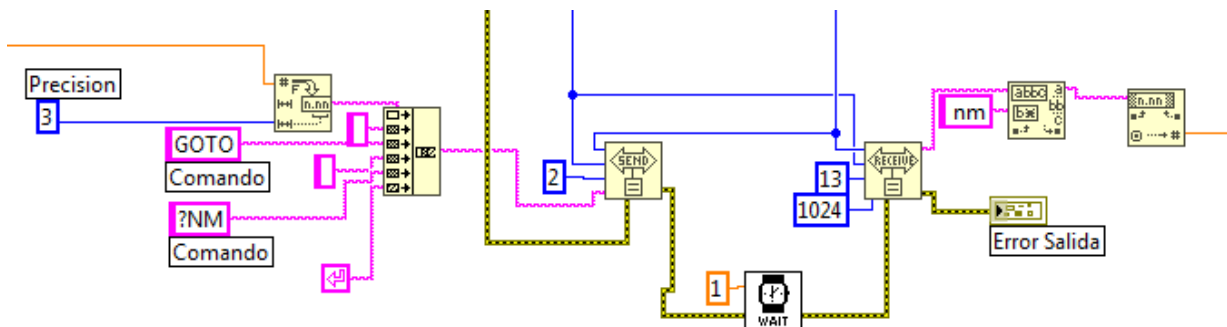


Figura 22 Block Diagram enviar y recibir

Se puede ver en la imagen (Figura 22) como el cable naranja que entra por la izquierda al primer bloque es el valor que se ha calculado antes, de incremento de longitudes de onda. En el bloque se le da una precisión de 3 decimales al valor y lo convierte a un *string*. En el siguiente bloque siguiendo de izquierda a derecha se encadenan varios *strings* que son los comandos que se envían al monocromador. GOTO para que vaya a la longitud de onda del valor y ?NM que pregunta en qué posición está, además se le añade un retorno de carro al final.

Un ejemplo: "155,300 GOTO ?NM \r".

El siguiente bloque al que se pasa es al de enviar la cadena de *strings* al monocromador y después de una espera de 1 segundo recibimos la respuesta del instrumento en el bloque 'RECEIVE'. Como la respuesta del monocromador la da con unidades en los últimos dos bloques de la derecha hay que recortar la cadena para que solo quede el valor de longitud de onda.

Un ejemplo: Se recibe: 155,30 nm Se recorta la cadena: 155,30

Y este valor es el que se utilizará para realizar la gráfica.

3. Comunicación y control del fotomultiplicador

3.1. Introducción a la operación y características del fotomultiplicador

Un fotomultiplicador es un aparato que convierte señales luminosas en señales eléctricas a partir de un alto voltaje externo. Las partes básicas de las que está compuesto un fotomultiplicador son:

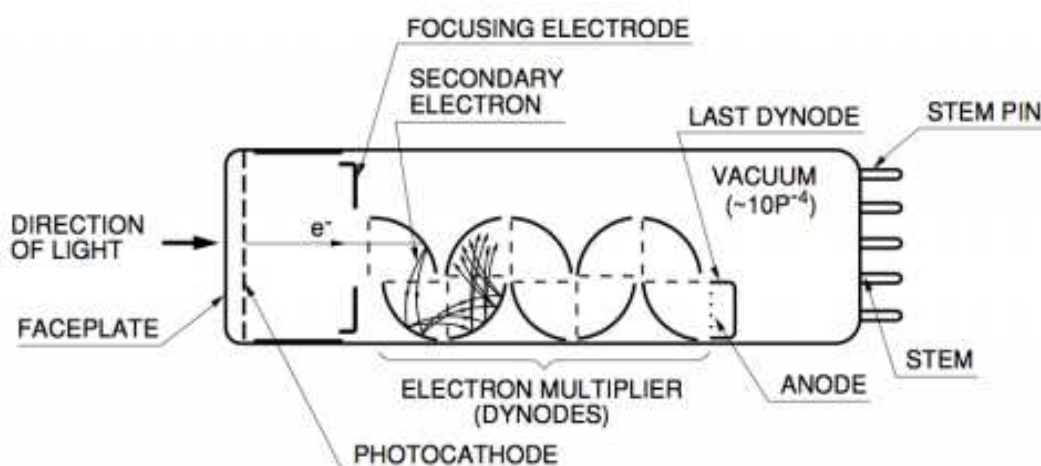


Figura 23 Partes de un fotomultiplicador

- *Ventana*: es la parte por donde entra la luz al fotomultiplicador. Es muy importante elegir el material de la ventana, ya que la transmitancia de la misma depende de la longitud de onda.

- *Fotocátodo*: es la parte donde, a causa del efecto fotoeléctrico, obtenemos electrones a partir de los fotones incidentes. Normalmente se conoce a este electrón como fotoelectrón, debido a su origen fotoeléctrico. Podemos definir un factor conocido como Eficiencia Cuántica (QE) obtenido a partir del cociente entre electrones obtenidos en el fotocátodo y el número de fotones que han incidido en él. El valor típico de la eficiencia cuántica está alrededor del 20%. También tiene una fuerte dependencia con la longitud de onda.

- *Electrodo de enfoque*: es la parte donde se enfocan los fotoelectrones para que acaben llegando al primer dínodo. No todos los fotoelectrones llegan al primer dínodo ocasionando una pérdida de carga. Con lo cual, podemos definir la eficiencia de colección (CE) como el cociente entre el número de electrones que llegan al primer dínodo y el número de fotoelectrones que salen del fotocátodo. El producto entre QE y CE nos dará el cociente entre electrones



del primer dínodo y fotones incidentes, que será una medida necesaria para la caracterización de los fotomultiplicadores.

- **Dínodos:** los dínodos son las partes donde se produce la amplificación de la carga. En ellos, los electrones incidentes acelerados por el alto voltaje (HV) arrancan gran cantidad de electrones de cada dínodo de tal manera que se produce un incremento de varios órdenes de magnitud la carga obtenida en el fotocátodo. Cabe destacar que la capacidad de arrancar electrones de los dínodos aumenta de manera exponencial conforme aumenta el HV. Para el buen funcionamiento del fotomultiplicador es importante que estén al vacío en su interior, ya que en caso contrario, los electrones arrancados podrían colisionar con las moléculas de gas que estén en su interior.
- **Ánodo:** es la parte donde se produce la captación de los electrones obtenidos a partir de todos los procesos de amplificación del fotomultiplicador.
- **Base:** la base es el circuito divisor de voltaje entre el cátodo y el ánodo y que permite la multiplicación de la carga. A la hora de suministrarles el alto voltaje, se puede trabajar de dos maneras diferentes, con la base negativa o con la base positiva. La base positiva trabaja con el cátodo conectado a tierra y el ánodo a alto voltaje positivo, mientras que la negativa trabaja con el ánodo a tierra y el cátodo conectado a alto voltaje negativo. [13]

El fotomultiplicador con el que se ha realizado el presente trabajo, como ya se ha mencionado anteriormente, es el modelo R5984 de Hamamatsu y las características principales se pueden observar en la tabla 7.

Parámetros	Valor
Tamaño de tubo	Dia.28 mm
Material fotocátodo	Multialkali
Área del fotocátodo	10 x 24 mm
Longitud de onda mínima	185 nm
Longitud de onda máxima	900 nm
Longitud de onda de máxima respuesta	400 nm
Material de la ventana	Cristal UV
Estructura del dínodo	Cajón circular
Etapas dinámicas del dínodo	9
Tensión entre ánodo y cátodo (Max.)	1250 V
[Ánodo] Corriente promedio	0.1 mA
[Cátodo] Sensibilidad luminosa Min.	140 $\mu\text{A/lm}$
[Cátodo] Sensibilidad luminosa Tipo.	300 $\mu\text{A/lm}$



Parámetros	Valor
[Cátodo] Índice de Sensibilidad Azul Ratio	9.0
[Cátodo] Rojo / Blanco Ratio	0.32
[Cátodo] Sensibilidad radiante Tipo.	76 mA/W
[Ánodo] Sensibilidad luminosa Min.	400 A/lm
[Ánodo] Sensibilidad luminosa Tipo.	3000 A/lm
[Ánodo] Sensibilidad Radiante	7.6×10^5 A/W
[Ánodo] Ganancia.	1.0×10^7
Tiempo de subida	2.2 ns
Tiempo de tránsito	22 ns

Tabla 7 Características fotomultiplicador R5984

3.2. Sistema de comunicación

El sistema de comunicación con el fotomultiplicador está compuesto por una conexión a través de conectores BNCs entre la salida del fotomultiplicador y dos cables que van directos a la tarjeta de adquisición de datos (Figura 24). La tarjeta es la encargada de recibir los valores de tensión, analizarlos y mostrarlos.

El fotomultiplicador no se controla porque su único objetivo es convertir las señales de luz que recibe a diferentes longitudes de onda en las que se posiciona el monocromador en señales eléctricas, en este caso en tensiones.



Figura 24 Conexión tarjeta de adquisición

Por tanto lo que se controla es la tarjeta de adquisición de datos que recibe continuamente las señales que está enviando el fotomultiplicador.

Hay que indicar también que el fotomultiplicador lleva una alimentación externa a la del monocromador. Se alimenta por medio de una fuente alimentación a 12V.

3.2.1. Controlador NI USB-6009

Para controlar la tarjeta de adquisición de datos desde el ordenador, lo primero que se tiene que hacer es descargar los driver que controlan el dispositivo, esto se encuentran en la página oficial de *National Instruments*.

Una vez que se han instalado los controladores y el PC reconoce el dispositivo, al igual que con el monocromador, se puede utilizar la aplicación que proporciona *National Instruments* para verificar que la comunicación es

correcta mediante un test de comunicación como podemos observar en la Figura 25.

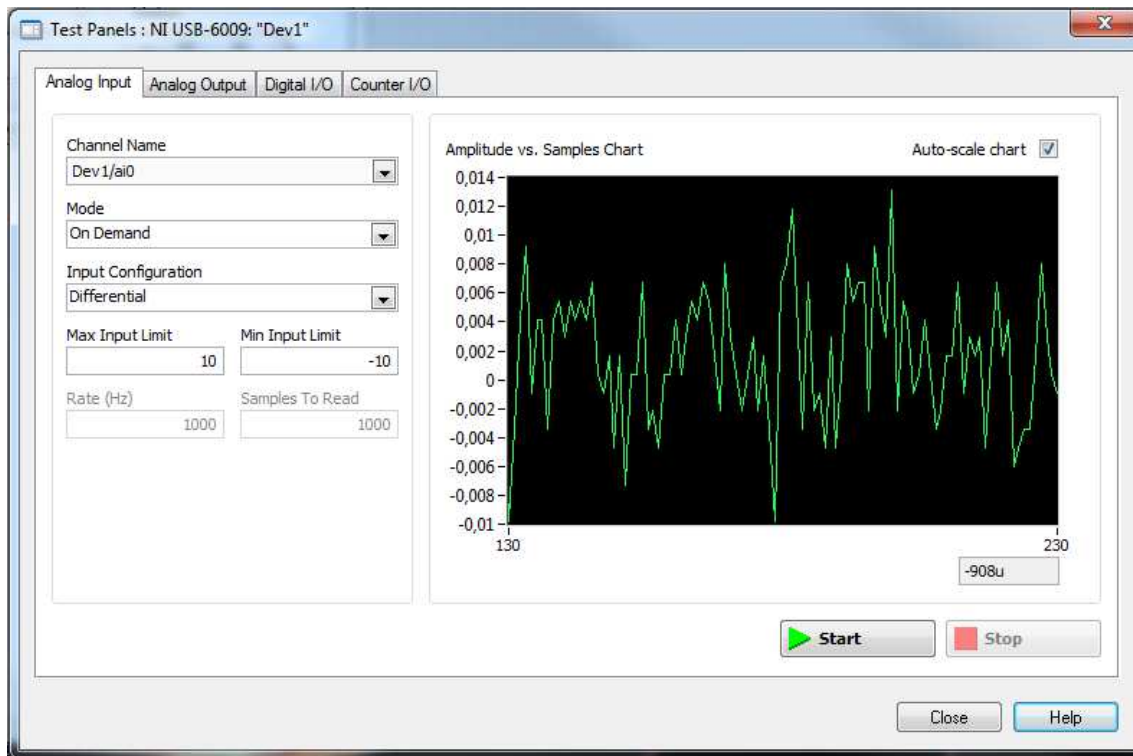


Figura 25 Test comunicación NI USB-6009

Lo siguiente que se ha de realizar es controlar la tarjeta con el entorno de *LabVIEW*. Cuando se ha instalado el driver de la tarjeta, también se han instalado en *LabVIEW* los VIs necesarios para controlarla.

En el diagrama de bloques de *LabVIEW* aparece un bloque con el nombre de *DAQ Assistant* como el que se puede ver en la siguiente figura (Figura 26), el cual tiene que ser configurado según las especificaciones que tenemos.

Para configurarlo como se puede observar en la ventana de la Figura 26 se puede elegir entre señales de entrada o de salida, digitales o analógicas y el tipo de parámetros con el que se va a operar.

En este caso se ha configurado como una señal de entrada analógica en la que se espera recibir voltaje. También se tiene que indicar por cuál de las entradas se espera recibir el voltaje e indicar si se va a recibir una señal diferencial o no.

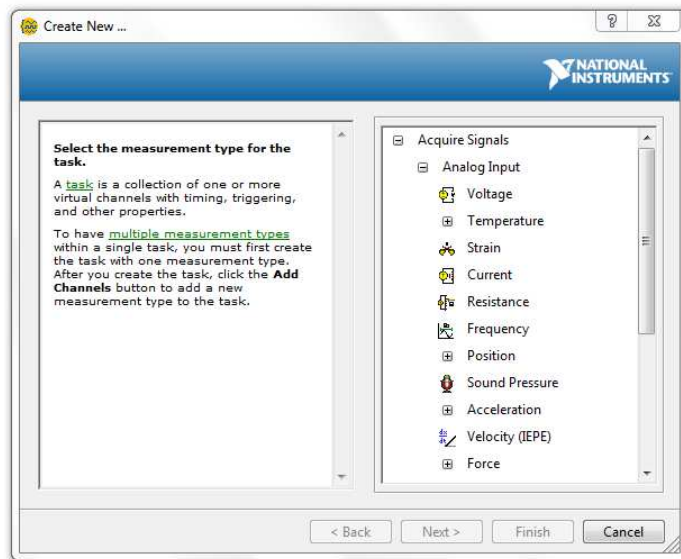


Figura 26 Configuración DAQ Assistant

Después de configurar como ha de ser el *DAQ Assistant* el propio programa generará un bloque con las especificaciones que se han indicado y con entradas y salidas para poder conectarlo a otros bloques y poder integrarlo en el sistema e implementarlo.

3.3. Sistema de control

La función del fotomultiplicador, como ya se ha explicado antes, es medir la tensión de la luz en cada longitud de onda. Para implementarlo, lo que se ha hecho es añadir el bloque *DAQ Assistant*, que se ha configurado como se ha explicado en el capítulo anterior, al bucle *for* del monocromador en el que se va posicionando en cada longitud de onda. Además el *DAQ Assistant* se ha metido dentro de otro bucle *for* que se ejecuta una sola vez durante el tiempo de integración determinado.

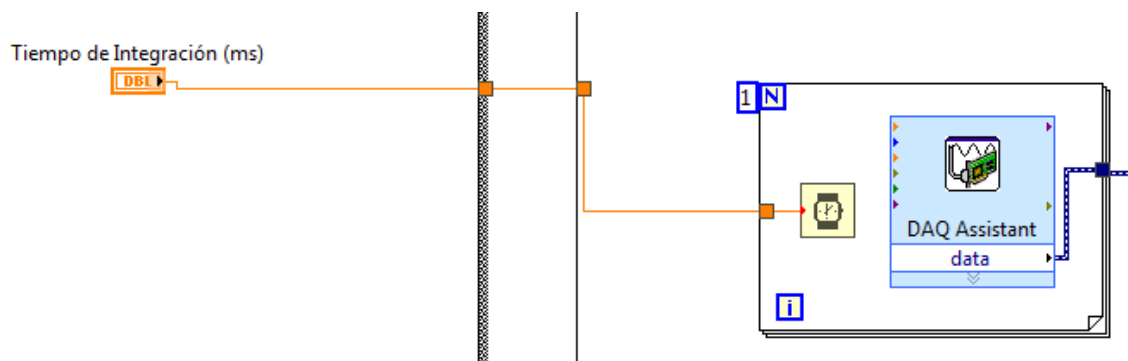
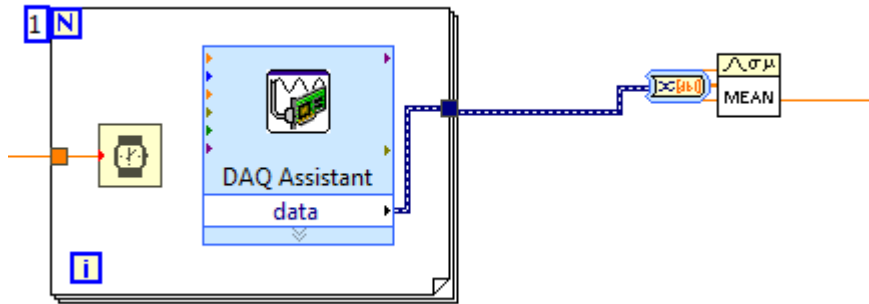


Figura 27 Block Diagram DAQ Assistant

Como se puede ver en la Figura 27 el bloque *DAQ Assistant* está dentro de un bucle *for* en el que también se encuentra el bloque con forma de reloj. El reloj es un *delay*, el cual está conectado a un controlador numérico. El valor del controlador numérico (Tiempo de integración) tiene que ser indicado por el usuario.

Con esto conseguimos que el *DAQ Assistant* esté recibiendo y almacenando datos durante el tiempo especificado y a su vez al estar dentro del bucle *for* del monocromador, recibe dichos datos en una longitud de onda específica.

Lo siguiente que se ha hecho es recoger todos los valores que recibe la tarjeta de adquisición y convertirlos en valores numéricos específicos para poder trabajar con ellos. Porque la tarjeta recibe datos en forma de voltaje y hay que convertirlos en números. Para esto se ha utilizado un bloque específico que convierte señales en valores dinámicos como podemos ver en la Figura 28.



Se observa como el convertidor dinámico está unido directamente al *DAQ Assistant* y también por el otro lado está unido a un bloque que realiza una media. Porque según las especificaciones se tiene que sacar una intensidad para cada longitud de onda. Por esto se ha puesto el bloque 'MEAN' que realiza la media de todos los valores que la tarjeta de adquisición ha recibido en una longitud de onda concreta.

4. Sistema de almacenamiento y representación

Para poder implementar la exportación de los datos a Excel, se ha tenido que descargar un *toolkit* que es un juego de herramientas que proporciona *National Instruments*, el cual permite la conexión de Microsoft Office con *LabVIEW* a través de una biblioteca de VIs fáciles de usar para crear o editar reportes en formato Excel.

Una vez que se ha instalado dicho *toolkit* se ha implementado en *LabVIEW* mediante los bloques existentes como podemos ver en la siguiente figura (Figura 30).

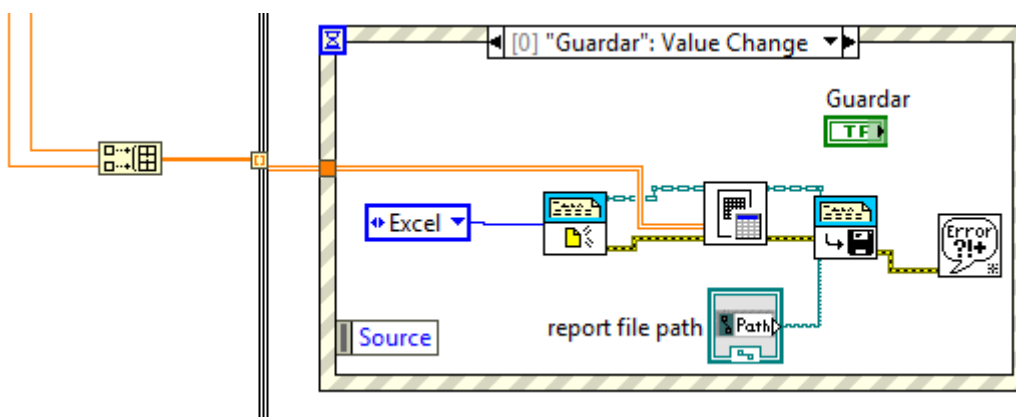


Figura 30 Block Diagram Guardar

Se ha creado una estructura eventual que se activa cuando se pulsa el botón guardar. Y dentro de esta estructura es donde se crea el reporte. Para ello se utiliza el primer bloque empezando por la izquierda dentro de la estructura que es el encargado de crear un nuevo reporte y está conectado a una constante (Excel) que indica en que formato se genera el reporte.

El siguiente bloque siguiendo hacia la derecha es el encargado de generar una tabla. Este bloque está conectado por dos cables al anterior, el cable verde es el reporte que se genera y el cable amarillo y negro es una línea de error que nos informa si hay algún problema al generar el reporte. Además este bloque, va conectado a los valores que sacamos del bucle *for* tanto del monocromador como del fotomultiplicador a través de los cables naranjas.

Una vez que se genera la tabla en el reporte el siguiente bloque guarda el reporte en el directorio que el usuario indique. Podemos observar que está unido por los dos cables de reporte y error al bloque anterior y además a un bloque denominado 'report file path' el cual es un controlador en el que el usuario puede elegir el lugar donde guardar el reporte en el ordenador.

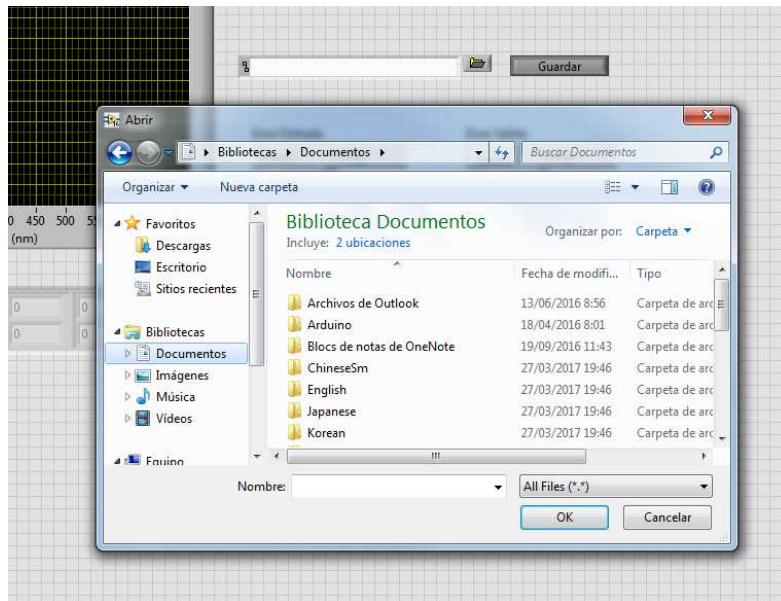
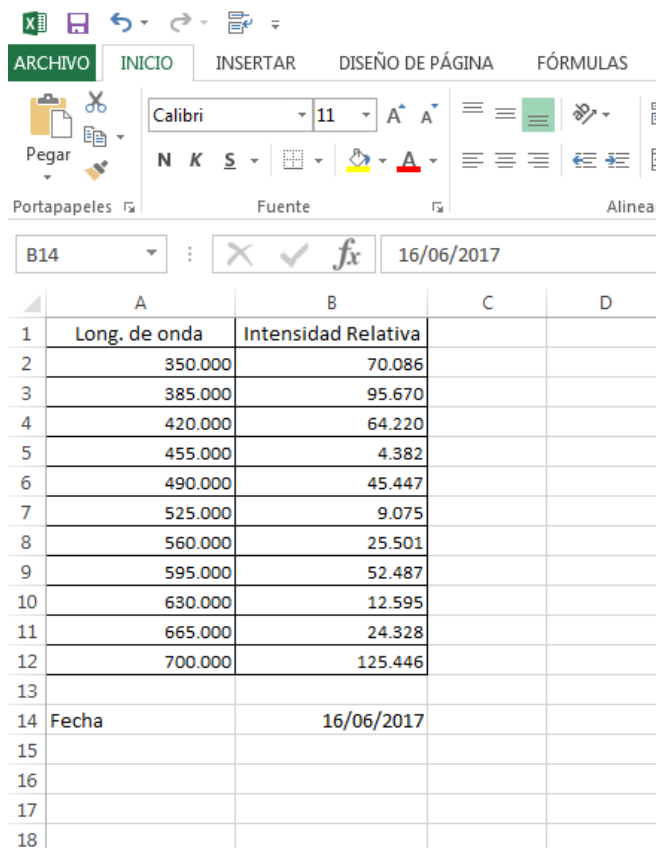


Figura 31 Front Panel Guardar

Si se pulsa el icono con la carpeta que está al lado del botón guardar, aparecerá una pantalla en la que podemos seleccionar donde podemos guardar el reporte y con qué nombre. Se puede observar en la Figura 31.

El reporte que se genera en formato Excel tiene las mismas características que se ven en la siguiente figura (Figura 32).



	A	B	C	D
1	Long. de onda	Intensidad Relativa		
2	350.000	70.086		
3	385.000	95.670		
4	420.000	64.220		
5	455.000	4.382		
6	490.000	45.447		
7	525.000	9.075		
8	560.000	25.501		
9	595.000	52.487		
10	630.000	12.595		
11	665.000	24.328		
12	700.000	125.446		
13				
14	Fecha	16/06/2017		
15				
16				
17				
18				

Figura 32 Reporte

Para finalizar se une a un bloque error que informa si se ha producido algún error al generar o al guardar el reporte mediante una pantalla emergente.

Para mostrar la gráfica en la pantalla del Front panel, se implementa en el Block Diagram por medio de un bloque que recoge ambos valores y los relaciona.

De esta forma cada vez que se ejecuta una iteración del bucle *for* acaba saliendo un valor en función del otro.

Estos valores relacionados se conectan al bloque de la gráfica y al bloque de la tabla, que nos mostrara todos los valores una vez acabado todas las iteraciones de la estructura. En la siguiente figura (Figura 33) se puede ver la implementación.

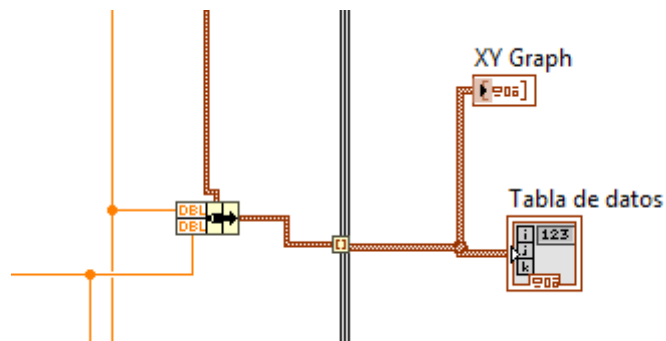


Figura 33 Block Diagram Grafica y tabla

5. Implementación y pruebas.

En la Figura 34 se puede apreciar la implementación total del sistema. Como ya se ha explicado antes, éste es el panel de diagrama de bloques en el que esta todas las partes explicadas anteriormente conectadas y formando la aplicación final.

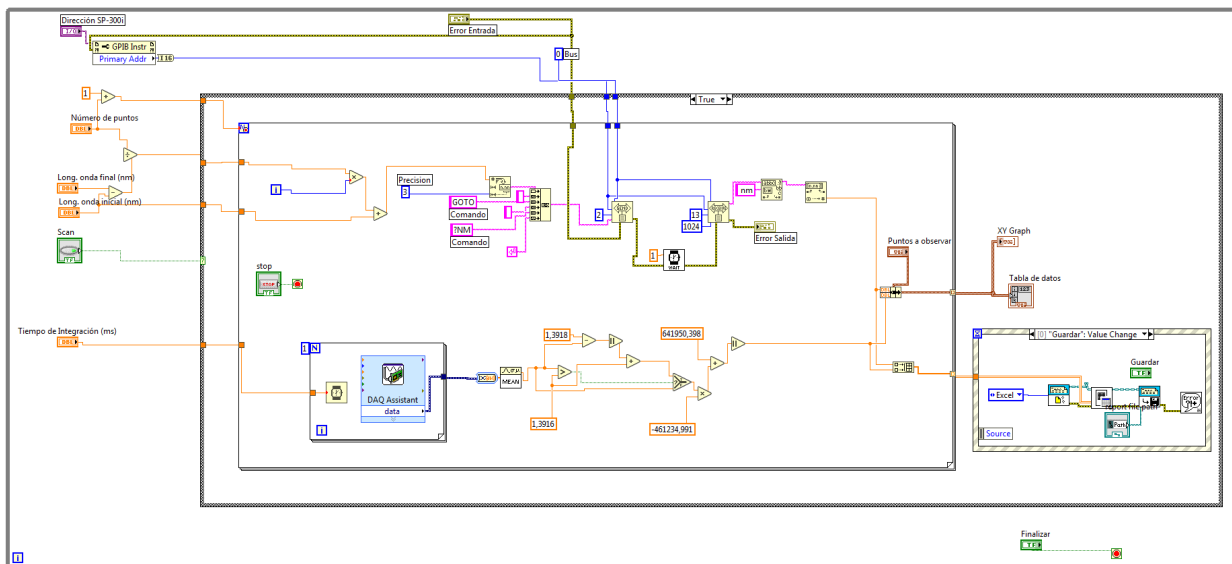


Figura 34 Block Diagram Grafica y tabla

Una vez que ya se ha desarrollado el sistema completo con las especificaciones determinadas, se han realizado una serie de pruebas comparando el resultado obtenido con la nueva aplicación y la anterior.

Se han realizado varias pruebas pero se han seleccionado para este trabajo las más significativas con la intención de tener en cuenta posibles mejoras de la aplicación.

Las pruebas son las siguientes:

- **Prueba con Nanocilindros de Aluminio en campo claro:**

En la siguiente imagen (Figura 35) se observa la muestra con la que se han realizado las pruebas. Esta muestra es una matriz de nano cilindros de aluminio con un diámetro de 160 nm y espaciado de 654nm.

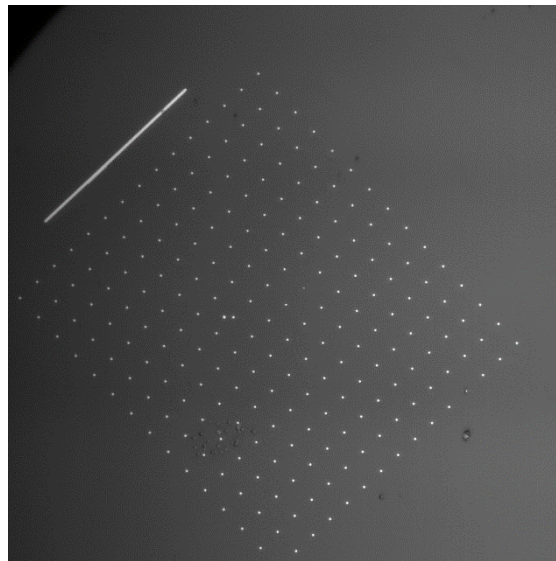


Figura 35 Nanocilindros de Aluminio campo claro

En las siguientes figuras (Figuras 36 y 37) se exponen los resultados obtenidos, en la primera figura la prueba se ha realizado con la aplicación antigua y en la siguiente con la aplicación nueva.

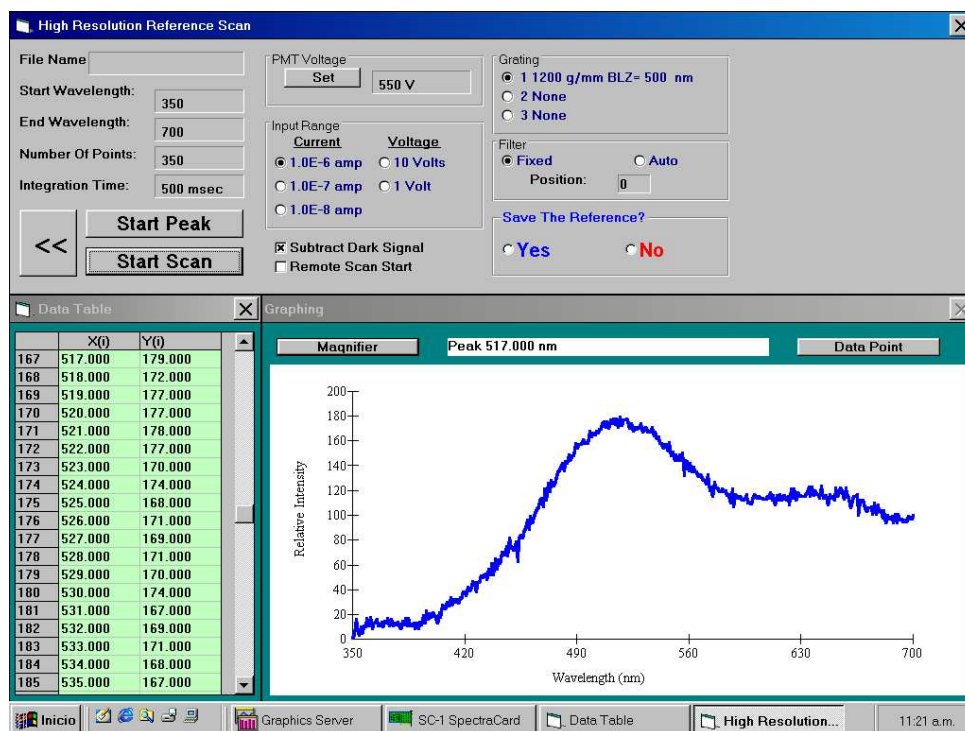


Figura 36 Prueba 1 Aplicación antigua

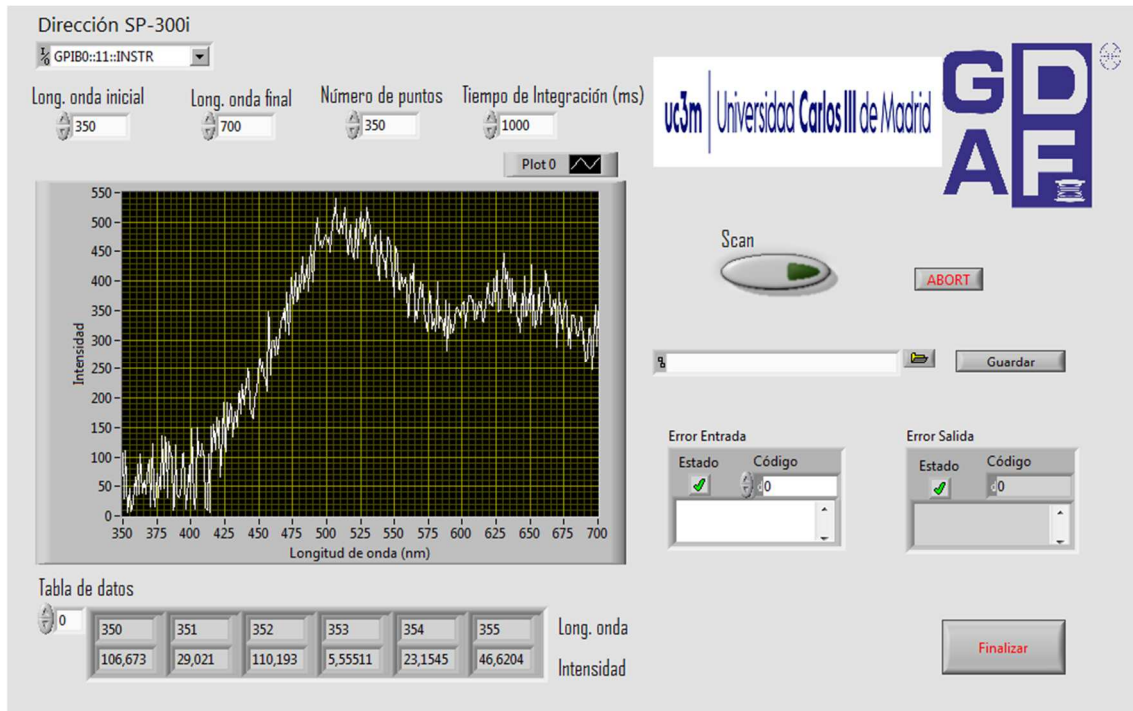


Figura 37 Prueba 1 Aplicación nueva

Comparando los dos resultados se puede ver como en la aplicación nueva existe mucho más ruido en la señal recibida. Esto puede ser por causa de la poca intensidad de luz de esta prueba y también de la calibración que podría ser más exacta. Ya que se ha calibrado sin ningún tipo de muestra y con pruebas en las que se estudiaban un menor número de longitudes de onda.

- **Prueba con Nanocilindros de Aluminio en campo oscuro:**

En la siguiente imagen (Figura 38) se observa la muestra que es la misma que en la prueba anterior pero ahora con el modo de campo oscuro.

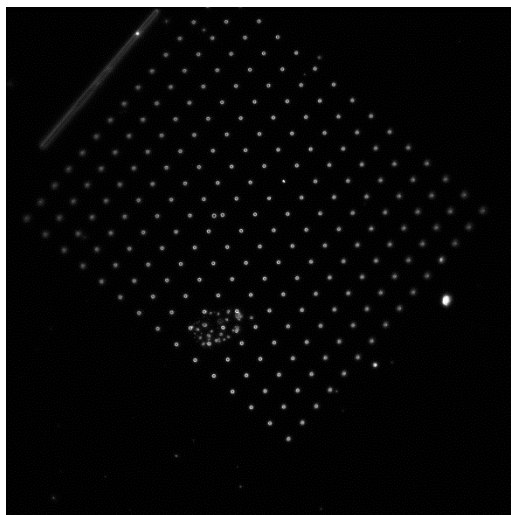


Figura 38 Nanocilindros de Aluminio campo oscuro

Como en la prueba anterior en las siguientes figuras se verán los resultados obtenidos (Figuras 39 y 40).

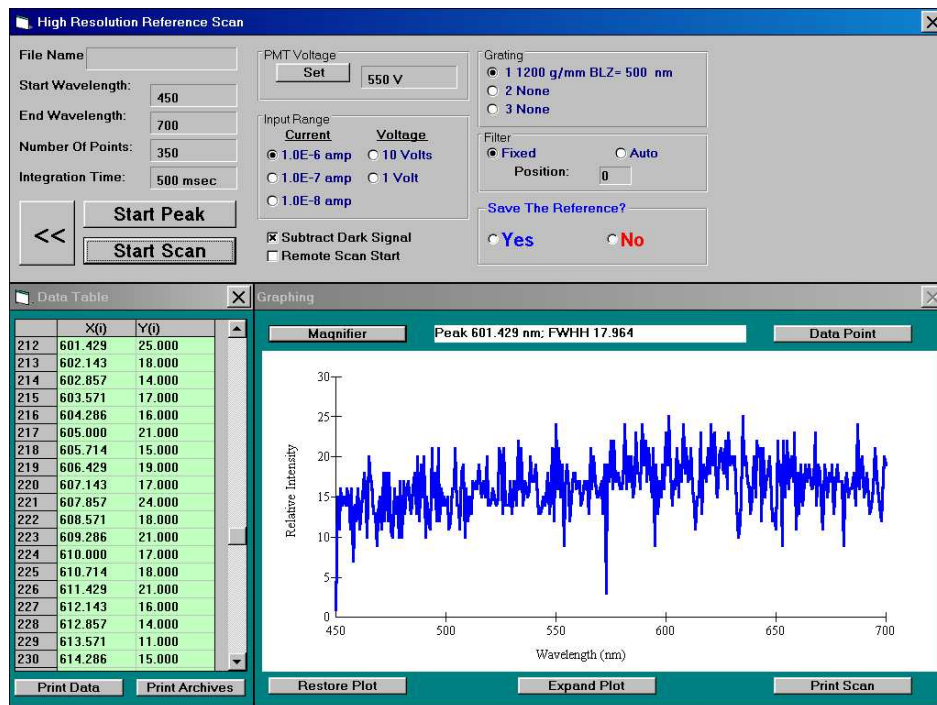


Figura 39 Prueba 2 Aplicación antigua

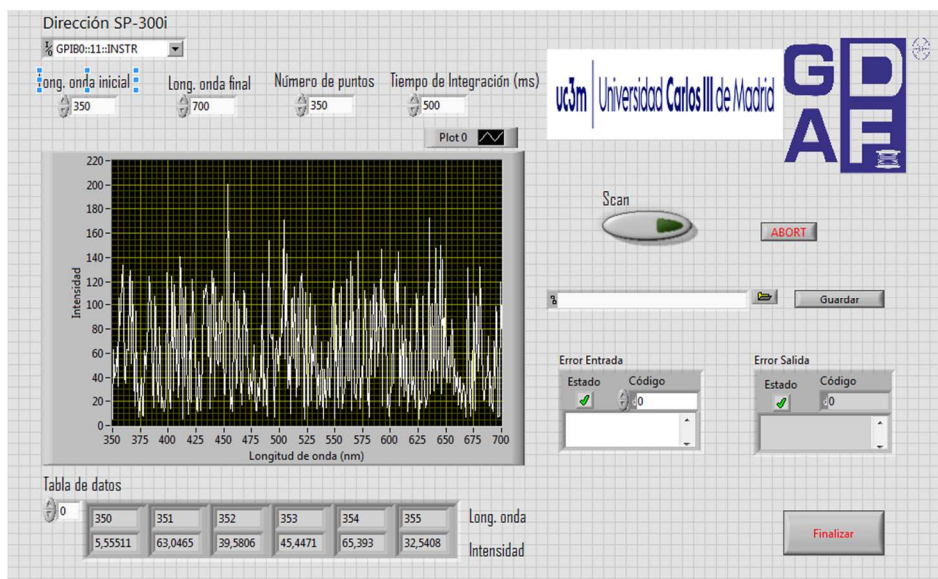


Figura 40 Prueba 2 Aplicación nueva

En este caso, dada la poca cantidad de luz que difunda la muestra, la cantidad de ruido es mucho mayor y la señal no presenta una forma muy definida. Como anteriormente se explicó, la nueva aplicación y el sistema de calibración que se ha usado no ha sido el más adecuado para reducir el ruido. Esto se ve claramente en la figura 40. Por ello, en un paso posterior, habrá que mejorar el calibrado y con ello reducir el ruido de la señal recibida.

- **Prueba de blanco:**

La siguiente imagen (Figura 41) es una muestra de blanco, la cual no contiene nada de la sustancia que se busca cuantificar y sirve para ajustar el instrumento.



Figura 41 Blanco en campo oscuro

Como en las pruebas anteriores en las siguientes figuras se verán los resultados obtenidos (Figuras 42 y 43).

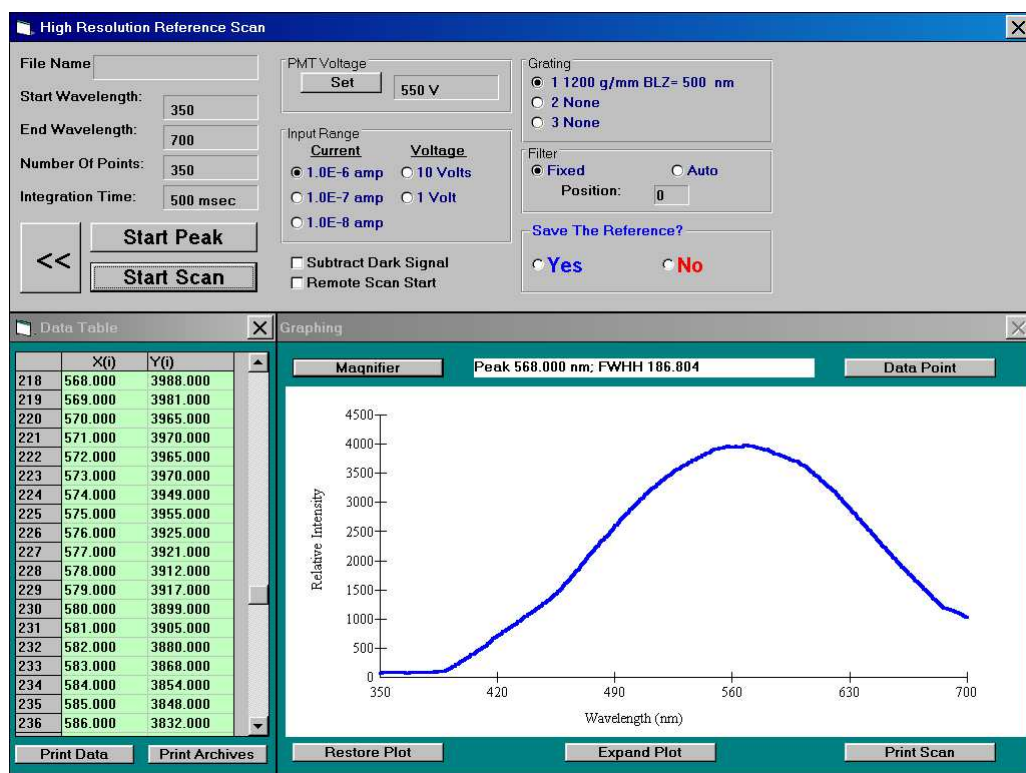


Figura 42 Prueba 3 Aplicación antigua

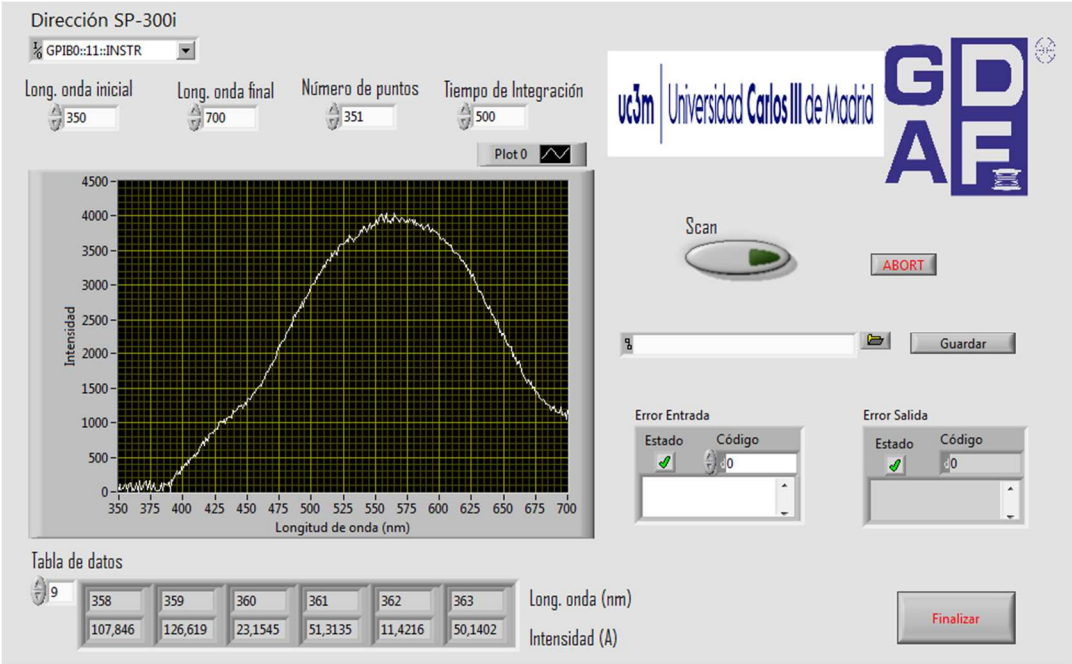


Figura 43 Prueba 3 Aplicación nueva

En esta prueba, al ser la intensidad de luz mucho más alta, se puede observar como el ruido desaparece y la gráfica en la aplicación nueva es prácticamente igual que en la aplicación antigua. Con esta prueba se llega a la conclusión de lo ya mencionado en las dos pruebas anteriores, la calibración está ajustada para mucha intensidad y habría que mejorar dicha calibración para reducir el ruido en pruebas que la intensidad sea menor.



6. Presupuesto

CONTROLADOR DEL MONOCROMADOR					
CÓDIGO	U.DE MEDIDA	DESCRIPCIÓN	MEDICIÓN	PRECIO UNIDAD	PRECIO TOTAL
1.1	unidad	NI GPIB-USB-HS	1	1.205,00 €	1.205,00 €
1.2	unidad	USB-6009	1	427,00 €	427,00 €
1.3	unidad	CONECTOR RECTO BNC	1	4,13 €	4,13 €
1.4	unidad	HORAS DE TRABAJO	180	26,34 €	4.741,20 €
TOTAL PRESUPUESTO					6.377,33 €

Tabla 8 Presupuesto

En la realización de este trabajo el importe total que se ha gastado es el que se indica en la tabla 8. El propósito al empezar con el trabajo era conseguir que el costo fuera inferior al del software de control del instrumento. Y también que el sistema implementado fuera lo más cómodo posible.

Se ha conseguido, debido a que muchos medios que se han utilizado ya estaban en la Universidad y no se ha tenido que invertir en ellos. La licencia de *LabVIEW* ya la tenía la universidad, la fuente de alimentación y el dock también estaban en el laboratorio, el ordenador es personal.

Acabado el estudio, se puede comprobar que se ha conseguido disminuir el presupuesto, ya que, aunque se hubieran comprado los demás medios el presupuesto hubiese sido menor que el del software del instrumento.

7. Conclusiones y posibles líneas futuras

7.1. Conclusiones

En relación con los objetivos, se considera que se han cumplido todas las especificaciones indicadas. El sistema consigue que se comuniquen y manejen perfectamente los dos instrumentos principales, el monocromador y el fotomultiplicador. Se ha creado un entorno más sencillo y cómodo, fácil de manejar y además fácil de actualizar, considerando que es algo muy importante para trabajos futuros.

Al haber utilizado *LabVIEW* como tipo de software la aplicación puede estar sujeta a continuas variaciones según las pruebas que se necesiten realizar, creo que éste es un aspecto importante, ya que puede irse adaptando y actualizando en concordancia con los avances tecnológicos que se vayan sucediendo.

El sistema implementado también facilita la movilidad de los medios, ya que casi todos los medios son fácilmente transportables, a diferencia del sistema anterior que solo podía estar sujeto a un solo banco.

Además de los medios también es fácilmente manejable la información que se puede extraer de las pruebas, esto facilitará la tarea de trabajar con los resultados obtenidos ya que Excel es un software muy utilizado en el mundo y el cual te permite manejar datos y realizar cálculos con ellos.

Se espera que el sistema desarrollado en este trabajo pueda ayudar al Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas de la Universidad en futuros trabajos e investigaciones.

7.2. Líneas futuras

Lo más inmediato que se podría realizar es mejorar el calibrado del fotomultiplicador con un mayor número de pruebas con muestras que se investigan y si es posible analizando todas longitudes de onda del espectro.

Además para mejorar los resultados de las pruebas se puede implementar que se hagan más de una medida por cada longitud de onda para que así el resultado sea más preciso.

En cuanto al sistema de la aplicación se podría mejorar que en el entorno se pudieran ajustar y/o modificar más parámetros del monocromador.

También se podría modificar en el reporte que además de obtener la tabla, se obtuviera la gráfica, fácil de realizar al poder trabajar con gráficas en la herramienta del Excel.



Bibliografía

- [1] Newton, I. Opticks (New York, Dover Publications, 1952), a treatise of the reflections, refractions, inflexions and colours of light. Two treatises of the species and magnitude of cuvilinear figures W. Innys, Ed. West-End of St Paul's (1730).
- [2] Kirchhoff, G; Bunsen, R. (1860) "Chemical Analysis By Spectral Observations"
- [3] Lehmann C., Interaction of radiation with solids and elementary defects production, Defects in crystalline solids Series, vol. 10
- [4] <http://www.netdoctor.es/XML/verArticuloMenu.jsp?XML=004047> Última vez consultada 02/06/2017
- [5] http://www.medic.ula.ve/histologia/anexos/microscopweb/MONOWEB/capitulo6_1.htm Última vez consultada 10/06/2017
- [6] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2563424> Última vez consultada 28/05/2017
- [7] http://www.scai.uma.es/servicios/area_microscopia/tem/tem.html Última vez consultada 16/06/2017
- [8] <https://es.scribd.com/document/130926165/Tubo-fotomultiplicador-1P28-1-pdf> Última vez consultada 10/06/2017
- [9] <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/201586#overview> Última vez consultada 12/06/2017
- [10] <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/201987> Última vez consultada 31/05/2017
- [11] <https://pendientedemigracion.ucm.es/info/Astrof/users/jaz/TRABAJOS/UGA RTE/3.htm> Última vez consultada 15/06/2017
- [12] <http://www.datsi.fi.upm.es/docencia/Arquitectura/ieee.pdf> Última vez consultada 13/06/2017
- [13] A. Bueno, Characterization of large area photomultipliers and its application to dark matter search with noble liquid detectors, 2008 JINST 3 P01006.



Acrónimos

CCD	Charge Coupled Device
DAQ	Data AcQuisition
GPIB	General Purpose Interface Bus
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
NI	National Instruments
VI	Virtual Instruments

Anexos

A.1 Manual de usuario

En el presente manual se explicara cómo manejar la aplicación.

- Lo primero es abrir el entorno de prueba LabVIEW con el nombre SP-300i.vi
- Una vez abierto, hay que pulsar la flecha que se indica en la imagen (Figura 44) para que la aplicación empiece a correr.

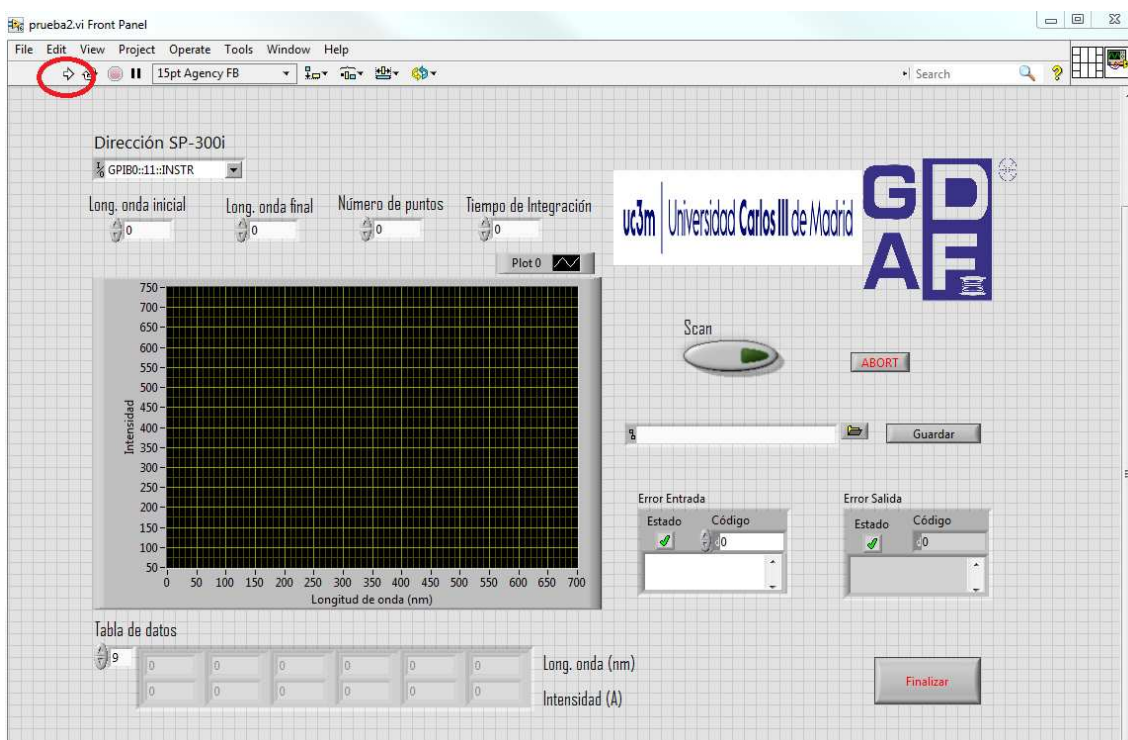


Figura 44 Entorno de prueba

- A continuación el usuario debe introducir los parámetros que quiera y darle al botón SCAN una vez que los haya introducido. Se puede visualizar como se enciende el led del botón
- Es importante que cuando el monocromador empieza a escanear se vuelva a pulsar el botón SCAN porque de esta manera evitamos que se vuelva a realizar el escaneo.
- Con el botón de SCAN apagado si se quiere interrumpir la prueba se ha de pulsar el botón ABORT.
- Para guardar los datos en Excel una vez que ha terminado la prueba, hay que pulsar el icono de la carpeta que está al lado del botón GUARDAR para introducir el directorio y el nombre con el que se quiere guardar el reporte.
- Si se desea finalizar el entorno de prueba hay que pulsar el botón FINALIZAR siempre con el botón SCAN apagado.